Spektrum DER WISSENSCHAFT

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

Spektrum DER WISSENSCHAFT 1/07 JANUAR 2007

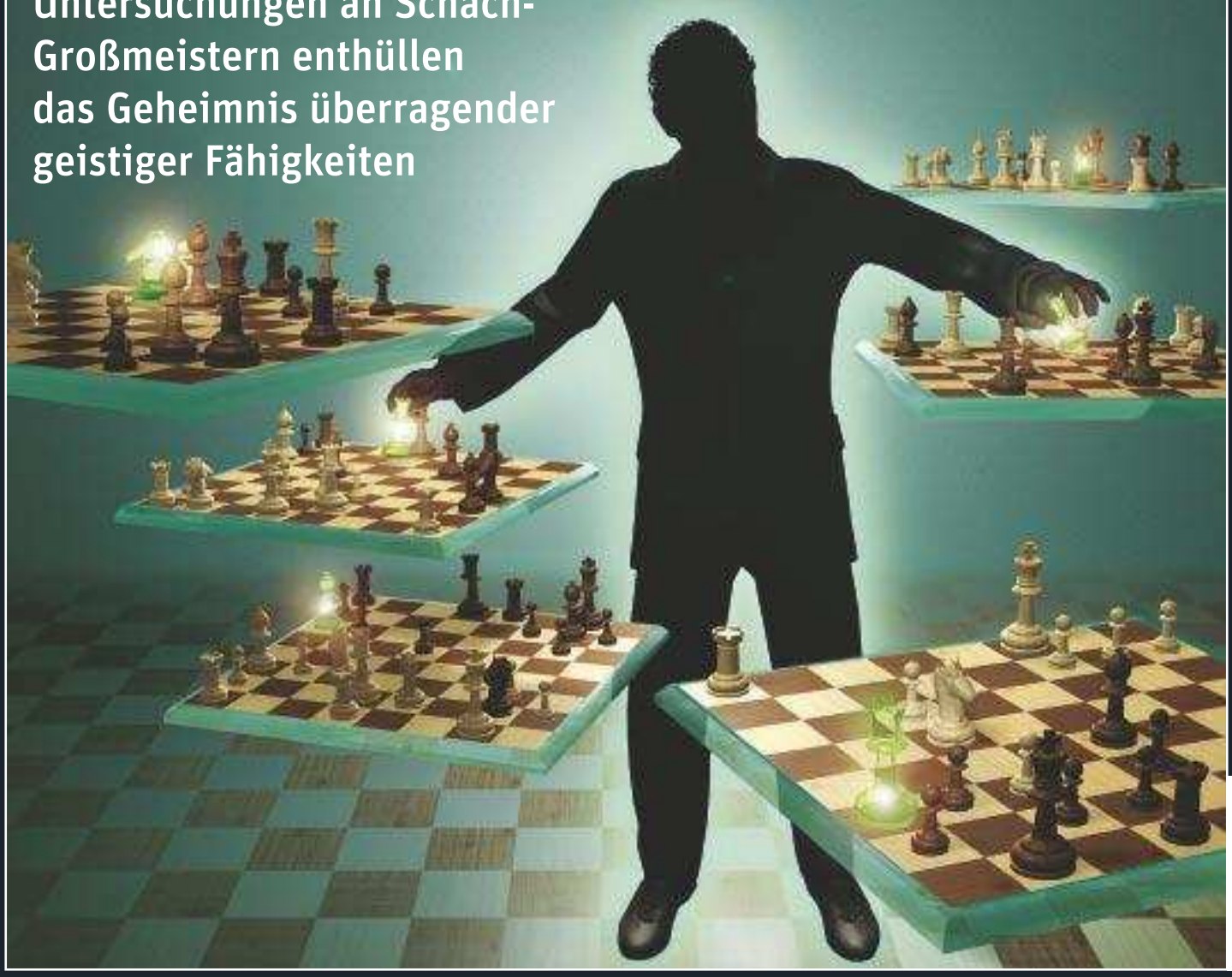
SINNE
Warum Vögel die Welt bunter sehen

KOSMOLOGIE
Das Weltall vor der Geburt der Sterne

MEDIZIN
Krebstherapie mit Stammzellen

Wie Genies denken

Untersuchungen an Schach-Großmeistern enthüllen das Geheimnis überragender geistiger Fähigkeiten



6,90 (D/A) · 13,50 sFr / Luxemburg 8,– €
D6179E

EDITORIAL

Reinhard Breuer
Chefredakteur

Rätselhafte Anfänge und der Papst

Wir haben, wie Sie sicher bemerkt haben, unsere »Außenansicht« verändert. Auch im Heftinnern haben wir an einigen Stellen Optimierungen vorgenommen. Der Grund: Jede Gestaltung »veraltet« einmal, vor allem weil sich die visuelle Symbolsprache der Zeit wandelt. Die Änderungen haben wir mit ausgewählten Gruppen unserer Leser und mit Nichtlesern getestet: mit detaillierten Fragen in Verbindung mit einer so genannten Blicksteuerungsanalyse, insbesondere für das Titeldesign. Die Resultate haben uns den Weg gewiesen und auf die jetzige Form geführt. Hoffentlich gefällt es auch Ihnen!

Die Frage, wie einst das Leben auf der Erde entstand, hat uns bei »Spektrum« über die Jahre immer wieder beschäftigt. Begann alles in kleinen Tümpeln? Kamen erste Lebenskeime aus dem Weltall – als extraterrestrische Starthilfe? Oder lieferten eher heiße Tiefseequellen die nötigen Ressourcen, um erste Lebensformen zu erschaffen?

Diese letzte These verfolgt schon seit Längerem Michael Russell. Ab S. 74 schildert der Geologe, wie sich im Umkreis alkalischer Quellen an mittelozeanischen Rücken schaumartige mineralische Strukturen abscheiden konnten, in deren Hohlräumen buchstäblich die Chemie stimmte. Auch der Münchener Chemiker und Patentanwalt Günter Wächtershäuser sowie Claudia Huber von der TU München steuerten weitere Befunde bei, die belegen, dass in diesem Milieu für die Lebensentstehung wichtige Katalyseprozesse ablaufen können. Diese würden, wie die beiden Forscher kürzlich in »Science« (27. Oktober, S. 630) notierten, das Tor öffnen für einen »vulkanischen, hydrothermalen Ursprung des Lebens«.

Noch weiter zurück zu den Anfängen geht unser Artikel über die »Dunkle Ära« des Kosmos. Verstärkt rücken die Astronomen jetzt dieser bislang eher vernachlässigten Phase des jungen Weltalls zu Leibe, in der weder Sterne noch Galaxien das kosmische Dunkel erhellten (S. 46). Die äußerst schwachen, niederfrequenten Radiostrahlen aus dieser Zeit versuchen die Forscher mit neuartigen Teleskopen einzufangen, so etwa mit dem Low Frequency Array (Lofar), über das wir noch einen eigenen Artikel planen.
Mit Anfängen ringen auch die Religionen dieser Welt. Aber verlässliche Erkenntnisse über sie verdanken wir nun mal, trotz aller Mythen und Dogmen, nur den Naturwissenschaften. Als Papst Benedikt XVI. in seiner folgenreichen Regensburger Rede in diesem September über die Beziehung von Vernunft und Glaube sprach, fühlte sich mancher, unabhängig vom dadurch ausgelösten Islamismusstreit, an versunkene antiaufklärerische Zeiten erinnert. Unser ständiger Mitarbeiter Michael Springer hat sich mit einigen Thesen des katholischen Oberhirten auseinandergesetzt. Auch der gelernte Physiker bekennt sich am Ende zum »Glauben«, wenn auch zu keinem religiösen (S. 118).

Herzlich Ihr

INHALT

SPEKTROGRAMM

12 Fit trotz Fett · Chilischarfes Spinnengift · Hurrikan auf Saturn · Roboter mit Selbstbild u. a.

15 **Bild des Monats**
Goldenes Gitter

FORSCHUNG AKTUELL

16 **Kims nuklearer Blindgänger**
Wieso der Atomtest Nordkoreas fast misslungen wäre

17 **Erdbeben der anderen Art**
Selbst schwache unterirdische Atomtests sind heute sicher nachweisbar

18 **Computer entdeckt neue Welten**
Spezialprogramm errechnet Struktur von Materialien unter Höchstdruck

22 **Eine »zweite Nase«**
Wie Mäuse Signalstoffe im Urin ihrer Artgenossen erschnüffeln

THEMEN

28 GESCHICHTE
Papyrologen rekonstruieren die Schriftzeugnisse der Antike

▶ 36 TITELTHEMA KOGNITIONSFORSCHUNG
Das Geheimnis der Genialität

▶ 46 KOSMOLOGIE
Dunkle Ära des Alls

▶ 56 BIOMEDIZIN
Verursachen Stammzellen Krebs?

64 FOTODETEKTOREN
Supraleitende Lichtsensoren

74 BIOCHEMIE
Woher das Leben kam

84 SICHERE SOFTWARE
Das Ende der Abstürze?

▶ 96 FARBENSEHEN
Warum Vögel bunter sehen

118 ESSAY
Glaube und Wissen

KOMMENTAR

24 SPRINGERS EINWÜRFE
Beim Geld hört die Freundschaft auf

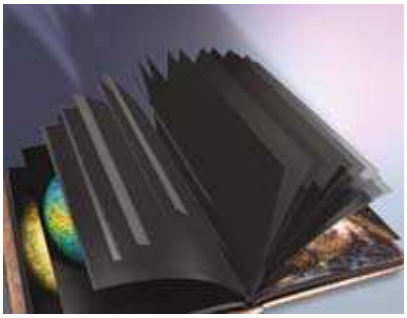
Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet; die mit 🔊 markierten Artikel können Sie als Audiodatei im Internet beziehen, siehe: www.spektrum.de/audio

SEITE 28

PAPYROLOGIE

Das Papier der Antike

Es sind oft nur Fetzen von Müllhalden des Altertums. Doch selbst kleinste Papyrusfragmente können Überraschungen bergen, von antiken Zollquittungen bis zu großer Weltliteratur



SEITE 46

ASTRONOMIE

Dunkle Ära des Alls

Kosmologen suchen in der finsteren Frühzeit des Universums nach den Keimen der ersten Galaxien. Neue Riesenteleskope helfen ihnen dabei

SEITE 56

BIOMEDIZIN

Stammzellen als Verursacher von Krebs?

Stammzellen können entarten. Das macht sie verdächtig, und bei einigen Krebsformen sind sie inzwischen sogar als Täter überführt

SEITE 64

FOTODETEKTOREN

Sehen mit Supraleitern

Detektoren aus Supraleitern reagieren sogar auf einzelne Lichtquanten. Solche hyperempfindlichen Sensoren entdecken extrem lichtschwache Himmelsobjekte, analysieren Chemikalien und Biopolymere

TITELTHEMA KOGNITIONSFORSCHUNG SEITE 36

Worauf beruht Genialität?

Große Denker oder begnadete Künstler vollbringen geistige Leistungen, die ans Wunderbare grenzen. Was befähigt sie dazu? Ist ihr Gehirn irgendwie anders – besser – als das normaler Menschen?

SEITE 74

BIOCHEMIE

Die heißen Anfänge des Lebens

Immer mehr spricht dafür, dass Hydrothermalquellen in der Tiefsee die Brutstätten des irdischen Lebens waren

SEITE 84

INFORMATIK

Neue Wege zu sicherer Software

Wer Computerabstürze und fehlerhafte Software satt hat, kann jetzt hoffen: Neuartige Prüfsoftware soll die Macken schon im Entwurf aufspüren

SEITE 96

SINNESPHYSIOLOGIE

Vögel sehen die Welt bunter

Dank eines alten Erbes der Wirbeltiere erkennen Vögel mehr Farben als wir

WISSENSCHAFT IM ...

27 **Rückblick:** Breitbandfilme · Bienen als Strahlungsdetektoren · Ansteckungsgefahr am Telefon · Straßenviagraph u. a.

44 **Alltag:** Aus alt mach' neu – das Duale System

JUNGE WISSENSCHAFT

92 **Siemens-Wettbewerb »Join Multimedia«**

REZENSIONEN

104 **Das All!** von Mary K. Baumann, Will Hopkins, Loralee Nolletti und Michael Soluri
Hubble von Lars L. Christensen und Bob Fosbury
Philosophie der Biologie von Ulrich Krohs und Georg Toepfer
Kollaps von Jared Diamond
Grenzen des Wachstums von Donella Meadows, Jørgen Randers und Dennis Meadows
Was ist wirklich drin? von Georg Schwedt
Mathematik für Sonntagmorgen von George G. Szpiro
Mathematik für Sonntagnachmittag von George G. Szpiro
Fünf Minuten Mathematik von Ehrhard Behrends
Physik der Superhelden von James Kakalios

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

114 **Der Enzensberger-Stern:** Dem Dichter wird eine algebraische Fläche gewidmet

WEITERE RUBRIKEN

3 **Editorial**
Neues Design für Spektrum

8 **Leserbriefe**

10 **Impressum**

94 **Preisrätsel**

122 **Vorschau**

TITELBILD

Geniale Schachspieler brauchen Talent, aber noch mehr Fleiss, um ihre Höchstleistungen zu erzielen

Titelillustration: Jean-François Podevin

LESERBRIEFE

Schlummernde Begabungen

Blick in ein Supergedächtnis
Oktober 2006

Offensichtlich kommt es immer wieder vor, dass durch Entwicklungsstörungen und Schädigungen des Gehirns beziehungsweise dessen linker Hälfte, Spitzenbegabungen in Erscheinung treten. Wie kann das ausgerechnet bei einem so komplizierten Organ geschehen?

Aus dem, was die Autoren schreiben, kann man schließen: Der normale Mensch hat wesentlich mehr Intelligenz, als er nutzen kann, und es gibt Bereiche im Gehirn, die Intelligenz unterdrücken. Also können mehr vorhandene Fähigkeiten genutzt und dadurch Verbesserungen erzielt werden, wenn die Verletzungen oder Störungen den Bereich betreffen, der Intelligenz unterdrückt.

Es ist nicht vorstellbar, dass Fähigkeiten und deren komplette Unterdrückung gleichzeitig entstehen können, zuerst müssen die Begabungen, dann deren Gegenspieler aufgetreten sein.

Das würde aber bedeuten, das es früher Menschen gab, die mit einem besseren Intellekt ausgestattet waren als die heutigen. Reste der frühen Fähigkeiten würden heutzutage als Inselbegabung in Erscheinung treten. Ein Puzzle dieser Reste könnte den Horizont der früher lebenden Menschen ergeben, den ich als Frühintelligenz bezeichnen möchte.

Roland Maier, Riemerling

Mobile Zukunftstechnik?

Hybride auf der Überholspur
November 2006

Autos wie Flugzeuge bauen

Im Artikel wird der Toyota Prius mit Vollhybrid-Antrieb als »Europas umweltfreundlichstes Auto« mit einem Verbrauch von 4,3 Litern auf 100 Kilometer angegeben. Wie wenig eindrucksvoll dies ist, zeigt ein Blick zurück in das Jahr 1994, wo ein Honda Civic mit VTEC-Economy-Motor bei der Eco Tour of Europe mit einem bis dahin unerreichten Verbrauch von 4,9 Litern pro 100 Kilometer siegte.

Die vergleichsweise junge Geschichte der zweisitzigen Ultraleichtflugzeuge zeigt jetzt schon beachtliche Leistungen mit Vorbildcharakter für den Automobilbau: Mit einer Abflugmasse von 472,5 Kilogramm (inklusive 90 Liter Treibstoff) und einer Reisegeschwindigkeit von 240 Kilometern pro Stunde erzielt ein modernes Ultraleichtflugzeug heute eine Reichweite von 1200 Kilometern. Wird die Reisegeschwindigkeit auf 200 Kilometer pro Stunde reduziert, erhöht sich die Reichweite immens. Warum nicht das Auto von Grund auf neu konstruieren? Autos würden dann weniger wie Panzer und mehr wie Flugzeuge entworfen.

Martin Rabe, Hagen

So genannte Plug-in-Hybride fahren mit Benzin und Strom. Sie können einfach an einer Steckdose aufgeladen werden – in Zukunft auch zu Hause?

Antwort des Koautors Reinhard Löser:

Leider ist ein Austausch des Verbrennungsmotors und seiner Nebenaggregate gegenüber einem Hybrid- beziehungsweise Elektroantrieb nicht sofort mit einem Gewichts- und Raumvorteil verbunden. Die heutigen Technologien erfordern im Gegenteil noch viel Aufwand beim Packaging und beim Abspecken des Gewichts. Leichte Materialien und innovative Bauweisen bis hin zu neuen Energiespeichern – vielleicht mit Hilfe der Nanotechnologie – sind hierbei aktuelle Stichworte. Heute sind die Reichweiten von Batterien noch stark eingeschränkt, weil sie im Vergleich zu flüssigen Kraftstoffen eine sehr geringe Energiedichte besitzen und deswegen ein großes Gewicht mit sich bringen.

Zusätzliche elektrische Speicher statt Verbrennungsmotor

Ein (Basis-) Auto erhält einen reinen Elektroantrieb; dies erlaubt eine starke Gewichtsreduzierung eines solchen Fahrzeugs, da ja nicht nur der Verbrennungsmotor wegfällt, sondern auch einige – teilweise schwere und/oder sperrige – Nebenaggregate wie Luftfilter, Kühler, Auspuffanlage, Generator, Tank, vielleicht sogar das Wechselgetriebe. Dieses eingesparte Gewicht kann dann in den elektrischen Speicher investiert werden. So sollte es möglich sein, ein Fahrzeug mit einer ausreichenden Leistung und Reichweite für den täglichen Normalbedarf zu versehen.

Johannes Peter Figgen, Cadolzburg

Wie funktioniert ein Atkinson-Motor?

Die Beschreibung des Atkinson-Motors bleibt unverständlich: Wie kann man durch elektronische Ventilsteuerung eine bessere Ausdehnung des Benzin-Luft-Gemischs erreichen? Eine Funktionsbeschreibung, die an dieser Stelle wirklich interessant wäre, sollte so vollständig sein, dass sie zu verstehen ist.

Dr.-Ing. Hans-Walter Lorch, Kamen

Antwort von Reinhard Löser:

Der Atkinson-Motor wurde zehn Jahre nach der Erfindung des Ottomotors durch James Atkinson entwickelt. Dabei handelt es sich um eine Modifikation der Ventilsteuerung, bei der die Einlassventile sehr spät schließen. So gelangt ein Teil des Gemischs zurück in den Ansaugtrakt und kann wieder verwendet werden.

Atkinson erreichte 1886 mit dieser Technologie eine zehnprozentige Leistungssteigerung gegenüber einem Ottomotor gleichen Hubraums. Allerdings verfügte sein Prinzip im unteren Drehzahlbereich über ein verhältnismäßig geringes Drehmoment und konnte sich deswegen nicht durchsetzen. Beim Hybridantrieb erlebt es jetzt eine Renaissance.

Plug-in-Hybride zu Hause auftanken

Hybridkonzepte für Fahrzeuge scheinen in meinen Augen nur begrenzt Sinn zu ergeben, wenn der elektrische Energiespeicher nicht an der heimischen Steckdose aufgeladen werden kann.

Johannes Peter Figgen, Cadolzburg

Antwort von Reinhard Löser:

Der Hauptvorteil von Hybridfahrzeugen – das sehen Sie schon an den Microhybrids – ist der Effizienzgewinn durch die Start-Stopp-Automatik sowie die Möglichkeit, Bremsenergie in elektrische Energie zurückzuwandeln, um die Batterie für das Bordnetz aufzuladen. Aus energie-ökonomischen Gründen und wegen der Ressourcenbegrenzung fossiler Treibstoffe muss der Verbrauch flüssiger Kraftstoffe weiter verringert werden – bis hin zum reinen Elektrofahrzeug. Dann wäre es am besten, wenn es sowohl daheim, auf der Arbeit als auch an speziellen Elektrotankstellen aufgeladen werden kann. Seit einigen Jahren gibt es europaweit öffentliche Stromtankstellen.

Reproduktionsmedizin und Ethik

Kein Verbot von Wunschkindern
Essay, Oktober 2006

Assoziation mit Verbrechen

So interessant Ihr Artikel auch ist und so sehr ich dem von Ihnen ausgeführten Schadensprinzip des Liberalismus zustimme, so sehr habe ich mich jedoch darüber geärgert, dass Sie Homosexualität als »Verbrechen ohne Opfer« bezeichnen.

Ein Wissenschaftler sollte in der Lage sein, seine persönliche Meinung als solche klar zu kennzeichnen und ihr nicht durch die Art der Formulierung Allgemeingültigkeit unterstellen. Die Assoziation von Homosexualität mit Verbrechen geht eindeutig zu weit.

Dipl.-Ing. Steffen Krüger, Köln

Antwort des Autors Edgar Dahl:

Als ich schrieb, dass Promiskuität, Prostitution, Pornografie und Homosexualität heute weithin als »Verbrechen ohne Opfer« gelten, wollte ich damit nicht sagen, dass die Homosexualität ein »Verbrechen« sei, das nur deshalb keine Strafe verdiene, weil es kein Opfer gebe.

Ich habe damit lediglich die gegenwärtige Haltung der westlichen Rechtsordnungen wiedergegeben und mich dabei des dafür geläufigen Begriffs bedient.

Die Bezeichnung Verbrechen ohne Opfer, die auf das Englische »victimless crimes« zurückgeht, ist in der Tat unglücklich gewählt. Die Anführungszeichen, die den Terminus zierten, waren auch durchaus mit Bedacht gewählt.

Die Mehrheit bestimmt die große Richtung

Eine Demokratie funktioniert mit Mehrheitsentscheidungen, wobei Belange von Minderheiten berücksichtigt werden, was sich in Kompromisslösungen ausdrückt.

Jedoch bestimmt die Mehrheit immer die große Richtung, das gilt auch für Werte. Schließlich stecken wir Terroristen ins Gefängnis, obwohl diese Minderheit ihre Taten nach ihrem Wertemaßstab als legitim betrachten mag. Dieses Vorgehen stellt noch lange keine Tyrannei der Mehrheit dar, sondern verhindert eine Diktatur der Minderheiten.

Weniger drastisch, aber im Grundsatz genauso, funktioniert es in Bezug auf die Reproduktionsmedizin. Mehr- wie Minderheiten haben die Möglichkeit, ihrer Auffassung Gehör zu verschaffen.

Holger Klessen, Marktrodach

Antwort von Edgar Dahl:

Herr Klessen beschönigt die »Tyrannei der Mehrheit«. Es ist noch nicht lange her, dass unser freiheitlicher Staat Homosexualtität strafrechtlich verfolgen ließ – unter Berufung auf das sittliche Empfinden der Mehrheit. War dies rückblickend in Ordnung? Sicher nicht!

Keine Medikamententests

Wenn ich »in dubio pro libertate« konsequent anwende, darf ich keine Medikamententests gesetzlich vorschreiben, sondern muss warten, bis die Schädigungen durch ein neues Medikament von anderen als dem Hersteller nachweisbar sind.

Aufgehört zu lesen habe ich bei der Stelle »Ist unter zwei Müttern aufzuwachsen tatsächlich ein schrecklicheres Schicksal, als gelähmt, taub, blind oder geistig behindert zu sein?« Wenn der Autor nicht unterscheiden kann zwischen dem Schicksal, das einen Menschen trifft und dem, was Menschen jemandem bewusst zufügen, finde ich das einfach traurig.

Bernhard Abmayr, Dormitz

Antwort von Edgar Dahl:

Ich kann beim besten Willen nicht sehen, dass ein lesbisches Paar, das sich dazu entschließt, ein Kind zu haben, diesem damit irgend etwas »antun« würde. Ich sehe auch nicht, dass eine staatlich geforderte Unbedenklichkeitsprüfung neuartiger Präparate oder Technologien einen Einwand gegen das Schadensprinzip darstellen würde. Im Gegenteil, sie soll ja lediglich einer Schädigung Dritter vorbeugen.

Auf Rücksichtnahme angewiesen

Herr Dahl übersieht, dass

- der Mensch von Natur aus auch ein soziales Wesen und auf gegenseitige Rücksichtnahme angewiesen ist;
- der Entstehungsort der Moral nicht der Staat, sondern die Gesellschaft ist, der Staat die Moral also nur vorfindet und in seine Gesetzgebung aufnimmt;
- die von ihm verteufelte Mehrheit gesellschaftliche Werte schafft, die für das Individuum Orientierungsmuster bilden, ohne die es sich in einem sozialen Niemandsland bewegt;
- der von ihm als einzige Freiheitsgrenze bestimmte Schaden eines anderen nicht vom einzelnen Bürger selbst definiert werden darf, da andernfalls der Willkür Tür und Tor geöffnet würde.

In letzter Konsequenz läuft die Auffassung des Autors auf ein Menschenbild des kulturlosen Wilden hinaus, eines Wolfes unter Wölfen im Sinn von Thomas Hobbes. Sie hat auch mit den Gedanken Wilhelm von Humboldts nichts mehr zu tun, der doch von dem Grundsatz ausging, dass ohne vom Staat gewährleistete Sicherheit keine Freiheit sei.

Dr. Eckart Lefringhausen, Geldern ▷

Briefe an die Redaktion ...

... sind willkommen! Tragen Sie Ihren Leserbrief direkt in das Online-Formular beim jeweiligen Artikel ein (klicken Sie unter www.spektrum.de auf »Aktuelles Heft« beziehungsweise »Heftarchiv« und dann auf den Artikel).

Oder schreiben Sie mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Frau Ursula Wessels
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg (Deutschland)
E-Mail: leserbriefe@spektrum.com

▷ Antwort von Edgar Dahl:

Was die Einwände von Herrn Dr. Lefringhausen betrifft, so gebe ich ihm in allen Punkten Recht. Zur gegenseitigen Rücksichtnahme zählt aber auch, dass wir die Werte unserer Mitmenschen tolerieren, sofern sie nicht die Rechte anderer verletzen. Im Übrigen sehe ich nicht, dass wir in Thomas Hobbes' fiktiven »Naturzustand« abzugleiten drohen, wenn wir es unfruchtbaren Paaren gestatten, von international etablierten reproduktionsmedizinischen Verfahren Gebrauch zu machen.

Anmerkung der Redaktion: *Die ausführlichen Briefe und Antworten des Autors lesen Sie unter:*
www.spektrum.de/leserbriefe

Experiment mit Unbekannten

Die ersten millionstel Sekunden
November 2006

Für diesen Beitrag gebührt den Autoren und Ihnen Dank. Die detaillierte Darstellung ist genauso bewundernswert wie die grafische Ausstattung.

Vermisst habe ich nur einen Hinweis darauf, dass es sich eben nicht um den »echten« Urknall handelt, sondern um ein Experiment mit innerkosmischer Materie. Man kann aus Gold oder Blei ebenso wenig eine Welt schaffen wie der Alchemist aus Quarzsand Gold. Wir wissen weder, welcher Ausgangsstoff dem Urknall zur Verfügung stand und ob es überhaupt einen gab, noch zeigt sich die Zusammensetzung des damaligen Quark-Gluonen-Plasmas. Und ist das Substrat eine Sache, so ist der Prozess noch eine andere. Zum Prozess gehört im Experiment der Apparat, und der muss mit jeder Annäherung größer werden. Man wird also, wenn man überhaupt den Mut hat, über die Bedingungen des Urknalls zu spekulieren, nicht mit den Begriffen »Singularität« und »Durchgang« auskommen, sondern müsste etwas über den Prozess und sein Material erzählen.

Dr. Siegfried Stephan, Rheinbach

Veränderung des Natur- und Wissenschaftsverständnisses

Symmetry and Complexity
Rezension, Oktober 2006

Während der Autor Mainzer in dem hier rezensierten Buch für ein nichtreduktives (System-) Wissenschaftsverständis auf der Basis aktueller nichtlinearer Komplexitäts-, Instabilitäts- und Selbstorganisationstheorien argumentiert, wählt der Elementarteilchenphysiker Genz den reduktiven Zugang eines Detaillisten: Einzelne mathematische Darstellungen werden von Kontexten gelöst und oberlehrerhaft kontrolliert.

So verfehlt die isolierte Lesart von Genz den grundlegenden Entwurf Mainzers, nämlich systematisch und historisch aufzuzeigen, dass und wie sich das Natur- und Wissenschaftsverständnis aktuell verändert. Genz kann Derartiges offenbar nicht gelten lassen, – zumal Mainzer nicht nur die Veränderung beschreibt, sondern sogar programmatisch für ihre Breitenanerkennung argumentiert.

Ass. Prof. Dr. Jan C. Schmidt, Atlanta

Eine Pflichtlektüre

Wo klemmt es wirklich bei wissenschaftlichen Berechnungen?
Essay, November 2006

Als Hobbyprogrammierer und Schüler mit naturwissenschaftlichem Ausbildungsschwerpunkt freut es mich, dass es dieser Zeitschrift immer wieder gelingt, neben der Darstellung des aktuellen Forschungsgeschehens auch einen Beitrag zur interdisziplinären Methodendiskussion zu leisten.

Das Scheitern der effektiven Nutzung zur Verfügung stehender Arbeitsmittel ist um so tragischer, wenn es durch Unwissenheit oder mangelnde Erfahrung geschieht.

So sei jedem Leser und insbesondere jedem Naturwissenschaftler, der zumindest Grundlagen des Programmierens beherrscht, ans Herz gelegt, die sehr fundierte Website des Autors zu besuchen und seinen wissenschaftlichen Werkzeugkasten zu evaluieren und zu erweitern.

Ich hoffe, dass diese Zeitschrift auch in Zukunft von den Schnittstellen der Forschung berichten wird, um damit den Horizont ihrer wissenschaftlich aktiven Leserschaft zu erweitern.

Georg Polzer, Leipzig

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Götz Hoeppe, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Christina Peiberg (kom. Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Heidelberg, HRB 338114
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könneker
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Petra Alm, Dr. Werner Gans, Dr. Rainer Kayser, Dirk Louis, Gerhard Samulat, Dr. Achim Schneider, Claus-Peter Sesín, Dr. Michael Springer.

Leser- und Bestellservice: Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de
Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt.
Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Hartmut Brendt, Tel. 0211 6188-145, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen: Ute Wellmann, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2481, Fax 0211 887-2686
Anzeigenvertretung: Berlin: Michael Seidel, Friedrichstraße 150, 10117 Berlin, Tel. 030 61686-144, Fax 030 6159005; Hamburg: Siegfried Sippel, Burchardstraße 17/I, 20095 Hamburg, Tel. 040 30183-163, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: fs//partner, Stefan Schließmann, Friedrich Sültemeier, Bastionstraße 6a, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 862997-0, Fax 0211 132410; Frankfurt: Klaus-Dieter Mehnert, Eschersheimer Landstraße 50, 60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 242445-38, Fax 069 242445-55; Stuttgart: Dieter Drichel, Werastraße 23, 70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-24, Fax 0711 22475-49; München: Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15/IV, 80331 München, Tel. 089 545907-30, Fax 089 545907-24
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 27 vom 01. 01. 2006.
Gesamtherstellung: Konradin Druck GmbH, Leinfelden-Echterdingen

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.
Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2006 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.
Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: Brian Napack, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg, Vice President/ Managing Director, International: Dean Sanderson

Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.

PRESSE Fachhandel

ERNÄHRUNG

Fit trotz Fett dank Rotwein?

Von zwei fettleibigen Mäusen ist die mit dem Antioxidans Resveratrol behandelte (Mitte) ebenso gesund und aktiv wie ihr schlanker Spielkamerad (links).

Ein Gläschen Rotwein ab und zu sei schließlich gesund – mit dieser Behauptung rechtfertigen Liebhaber eines guten Tropfens gern ihr kleines Laster. Tatsächlich haben diverse Untersuchungen die gesundheitsfördernden Eigenschaften eines Inhaltsstoffes von Rotwein namens Resveratrol bestätigt. Nun erwies sich dieses Antioxidans in einer Studie an Mäusen sogar schier als Wundermittel für Übergewichtige. Fettleibige Tiere, denen es verabreicht wurde, lebten im Mittel fast ebenso lang wie ihre schlanken Käfiggenossen. Unbehandelte dicke Mäuse starben dagegen im Durchschnitt um ein Fünftel früher. Außerdem hatten sie die für Beleibte typische vergrößerte Leber. Nicht so die Nager, die in den Genuss von Resveratrol kamen.

Auch zu Diabetes neigten die behandelten Tiere nicht so stark wie ihre fetten Artgenossen. Selbst ihre Lebensqualität verbesserte sich. So standen sie in Sachen Beweglichkeit und Koordination schlanken Mäusen kaum nach. Zum Beispiel konnten sie sich fast genauso lange in einem Laufrad halten, das sich stetig beschleunigte. Selbst wenn die Ergebnisse auf den Menschen übertragbar sein sollten, sei freilich davor gewarnt, die Effekte durch Rotweingenuss erzielen zu wollen – entsprach die verabreichte Dosis doch dem Inhalt einiger Dutzend Flaschen am Tag.

Nature, 16. 10. 2006, S. 337

NEUROPHYSIOLOGIE

Chilischarfes Spinnengift

Wer sich einmal zuviel Chilisoße in die Mahlzeit gemischt hat, kennt ihn – den brennenden Schmerz, der sich auch durch reichlichen Wassergenuss kaum lindern lässt. Ganz ähnlich wirkt der Biss der Vogelspinne. Den Grund dafür haben nun Wissenschaftler um Jan Siemens von der Universität von Kalifornien in San Francisco entdeckt. Demnach enthält das Gift der Vogelspinne bisher unbekannte Substanzen, von den Forschern Vanillotoxine genannt. Sie heften sich an denselben Nervenrezeptor wie das Capsaicin der Chilischote. Dieser signalisiert normalerweise eine Verbrennung und löst eine lokale Entzündungsreaktion aus. Das Gleiche geschieht bei künstlicher Aktivierung durch die Toxine von Vogelspinne und scharfer Peperoni.

GERRY ELLIS / MINDEN PICTURES

Vogelspinnen wehren sich mit derselben chemischen Keule gegen das Gefressenwerden wie Chilischoten.

Allerdings gibt es einen Unterschied zwischen Pflanze und Krabbeltier. Capsaicin lässt nur Säuger Feuer spucken und verschont die Vögel; denn die sollen den Samen der Schote verbreiten. Das Vogelspinnengift wirkt dagegen nicht so selektiv. Schließlich zählen die Vögel zu den größten Fressfeinden der Achtbeiner.

Nature, 9. 11. 2006, S. 208

PHYSIK

Wärme auf der Einbahnstraße?

Die Diode, ein Gleichrichter elektrischer Ströme, ist Vorbild eines neuen thermischen Bauteils, das laut Angabe seiner Hersteller Wärme bevorzugt in eine Richtung fließen lässt. Es enthält winzige Röhrchen aus Kohlenstoff oder Bornitrid, an deren einem Ende außen schwere Moleküle aufgedampft wurden. Die nur wenige Nanometer dicken molekularen Zylinder sind zwischen einen Sensor und eine Heizvorrichtung eingespannt. Der gemessene Wärmefluss vom beschwerten Ende zum anderen soll um sieben Prozent höher liegen als in umgekehrter Richtung.

Wie schon vor über fünfzig Jahren der Physiker Rudolf E. Peierls festgestellt hatte, zeigt das Verhalten quasi eindimensionaler Systeme, als die sich die Röhrchen ansehen lassen, quantenmechanische Besonderheiten. Mit ihnen erklären die Hersteller des asymmetrischen Wärmeleiters – Forscher um Alex Zettl von der Universität von Kalifornien in Berkeley – die Funktionsweise ihres Geräts. Dabei bringen sie Phononen (interne Schwingungen der Röhrchen) ins Spiel, die als Solitonen (nicht zerlaufende Wellen) wirken. Es fragt sich allerdings, ob das Gerät nicht den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik verletzt. Als Anwendungsmöglichkeiten nennen die Forscher Kühlschränke, Energie sparende Gebäude und Computerchips.

Science, 17. 11. 2006, S. 1065

ROBOTIK

Maschinenwesen weiß sich zu helfen

Was, wenn ein Roboter auf einer wichtigen Mission Schaden nimmt? Am besten repariert es sich selbst oder findet kreativ einen anderen Weg, seinen Auftrag auszuführen. Das klingt futuristisch. Dass es im Prinzip machbar ist, haben Josh Bongard und Kollegen von der Cornell-Universität in Ithaca (New York) nun jedoch demonstriert.

Ihr vierbeiniger Roboter mit acht Gelenken verfügt über kein festes Laufprogramm. Bevor er losmarschiert, macht er vielmehr eine Reihe willkürlicher Bewegungen. Deren Ergebnis ermittelt er mit Hilfe von Sensoren, die Daten über die Neigung und Beugungswinkel der Gelenke liefern. Daraus leitet das Gerät denkbare Modelle seiner eigenen Struktur ab. Dann testet es mit gezielten Bewegungen, welches dieser Selbstbilder am genauesten zutrifft. Anschließend berechnet es die dafür optimale Fortbewegungsart.

Auch nach dem Loslaufen vergleicht der Vierbeiner stets den vorhergesagten mit dem tatsächlich eingetretenen Zustand und verfeinert damit sein Eigenmodell. Tritt eine größere Diskrepanz auf, stoppt er und startet erneut mit der Selbstfindung. Auf diese Weise konnte der Roboter in Tests selbst nach Amputation eines Beins weiterlaufen. Generell würde er also in gewissem Ausmaß mechanische Defekte verkraften und käme auch mit einem unbekannten Untergrund klar. Dies wäre ideal für eine autonome Mission in schwer zugänglichem Territorium – etwa auf einem anderen Planeten.

Science, 17. 11. 2006, S. 1118

CORNELL COMPUTATIONAL SYNTHESIS LAB

Der vierbeinige Roboter entwickelt und überprüft anhand von Sensordaten stets ein Modell seiner Struktur und leitet daraus die optimale Fortbewegungsart ab.

ARCHÄOLOGIE

Rätselhafte Schwärzung

Stets sind Zeugnisse der Vergangenheit vom Zerfall bedroht. Beispiel Pompeji: Einst leuchtend rote Fresken haben sich dort mit den Jahren grau bis schwarz verfärbt. Wissenschaftler um Marine Cotte von der European Synchroton Radiation Facility (ESRF) in Grenoble wollten nun die Ursache ergründen.

Mit Röntgenstrahlen durchleuchteten sie die Wände der erst vor zwanzig Jahren ausgegrabenen Villa Sora in Torre del Greco und ermittelten so die chemisch-mineralische Zusammensetzung. Bislang glaubte man, das rote Pigment Zinnober habe sich durch Sonnenstrahlung im Lauf der Jahre in schwarzes Metazinnober verwandelt. Doch davon fand sich keine Spur. Stattdessen stießen Cotte und ihr Team in den grauen Bereichen unter anderem auf schwarzes Kalomel, das entstehen kann, wenn das Quecksilbersulfid des Zinnobers mit Chlor reagiert.

Rätselhaft ist dagegen der Befund in den völlig geschwärzten Arealen. Dort entdeckten die Forscher vor allem Sulfat: Offenbar hat hier Schwefelsäure aus der Luft den in den Wänden enthaltenen Kalk in Gips verwandelt. Der allein kann die dunkle Farbe aber nicht erklären, ist er doch in reiner Form strahlend weiß. Möglicherweise hat er Rußpartikel eingelagert. Allerdings findet sich Gips auch an Stellen, die noch rot leuchten. So bleibt der Grund für die Schwärzung vorerst ein Geheimnis.

Analytical Chemistry, 1. 11. 2006, S. 7484

MARIO PAGANO

Rätselhafte Schwärzung: Fresken der Villa Poppea in Oplontis

ASTRONOMIE

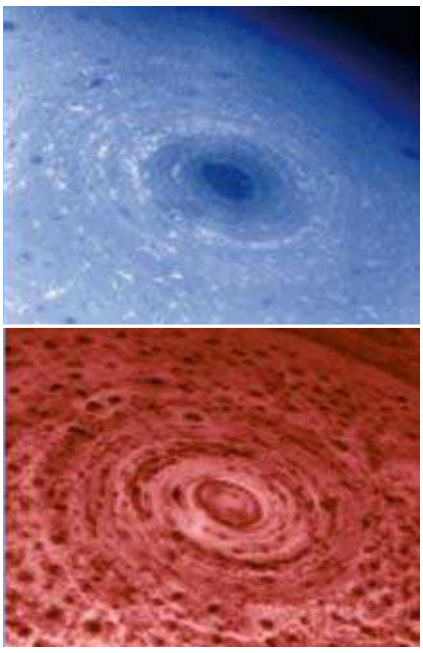
Hurrikan auf Saturn

Das hatten selbst altgediente Nasa-Forscher noch nie gesehen: einen extraterrestrischen Hurrikan. Die Raumsonde Cassini bekam dieses Naturschauspiel nun an Saturns Südpol erstmals vor die Linse. Riesige Wirbel auf anderen Planeten wie etwa Jupiters Roter Fleck sind zwar seit Langem bekannt. Ihnen fehlt aber das für einen Hurrikan typische Auge samt der es umgebenden Wolkenwand. Der Saturnwirbel hat beides. Im Querschnitt misst er 8000 Kilometer – zwei Drittel des Erddurchmessers. Die Windgeschwindigkeiten betragen bis zu 550 Kilometer pro Stunde, fast das Doppelte des Werts, den »Wilma«, der stärkste je auf Erden gemessene Hurrikan, im Oktober 2005 erreichte.

Die Wolkenwand um das Auge des Saturnwirbels türmt sich bis zu 75 Kilometer hoch auf – fünfmal so hoch wie bei irdischen Hurrikanen. Das Loch im Zentrum erlaubt damit einen ungewöhnlichen tiefen Blick in die Gashülle des Planeten. Am Grund ließen sich geheimnisvolle dunkle Strukturen ausmachen.

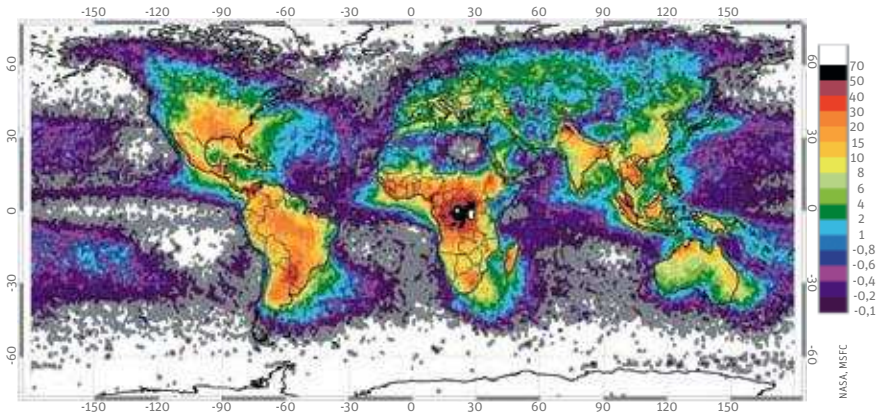
Trotz der äußerlichen Ähnlichkeiten unterscheidet sich Saturns Hurrikan jedoch prinzipiell von seinen irdischen Gegenstücken. Anstatt umherzuwandern, bleibt er am Südpol fixiert. Auch der Entstehungsmechanismus muss ein anderer sein, da hier kein Ozean unter den Wolken existiert, der mit seinem heißen Wasser die Energie liefert.

Pressemitteilung der Nasa vom 9. 11. 2006



NASA

Der Saturnwirbel (in Falschfarben) bei zwei Wellenlängen im Infrarotbereich



METEOROLOGIE

Gewitter weltweit

Wo auf der Welt blitzt es am häufigsten und gibt es die schwersten Stürme? Bisher ließ sich diese Frage nicht klar beantworten, weil nur Informationen von Bodenstationen vorlagen, die sehr ungleichmäßig über die Erde verteilt sind und deshalb kein repräsentatives Bild liefern. Doch seit 1998 beobachtet der Nasa-Satellit TRMM *(Tropical Rainfall Measuring Mission)* das Wettergeschehen vom Weltraum aus. Er ist nicht nur mit Geräten zur Messung der Blitzhäufigkeit und der Temperatur an der Wolkenoberseite ausgerüstet, sondern auch mit einem Niederschlagsradar.

Nun haben Forscher um Edward Zipser von der Universität von Utah in Salt Lake City aus seinen Daten die weltweite Unwetterhäufigkeit und -intensität abgeleitet – mit teils überraschenden Ergebnissen. Wer hätte zum Beispiel gedacht, dass die südlichen Ausläufer der Sahara zu den Zonen mit den heftigsten Gewittern auf der Welt gehören? Den Spitzenplatz belegt allerdings die Gegend östlich der argentinischen Anden, wo warme, feuchte Luftmassen aus den Ebenen auf die kalte, trockene Luft der Berge stößt. Generell zeigt Zipsers Analyse, dass Unwetter an Land häufiger auftreten und heftiger ausfallen als über dem Meer.

Pressemeldung der Nasa vom 26. 10. 2006

Die meisten Blitze pro Jahr und Quadratkilometer gibt es, wie diese Karte zeigt, in Zentralafrika. Die heftigsten Gewitter – mit mehr als tausend Blitzen pro Minute – treten allerdings östlich der argentinischen Anden auf.

KOGNITION

Tierische Merkfähigkeit

Das Gedächtnis von Pavianen ist affenscharf, und auch Tauben können sich erstaunlich viel merken. Das haben Forscher um Joel Fagot von der Université de la Méditerranée in Marseille und Robert Cook von der Tufts-Universität in Medford (Massachusetts) herausgefunden. Die Wissenschaftler zeigten zwei Pavianen und zwei Tauben immer wieder Serien von Bildern, wobei links oder rechts davon jeweils eine Taste aufleuchtete. In Erinnerungstests mussten die Tiere dann zu jedem Bild die zugehörige, nun dunkle Taste drücken. Die Paviane benutzten dazu einen Joystick, die Tauben ihren Schnabel.

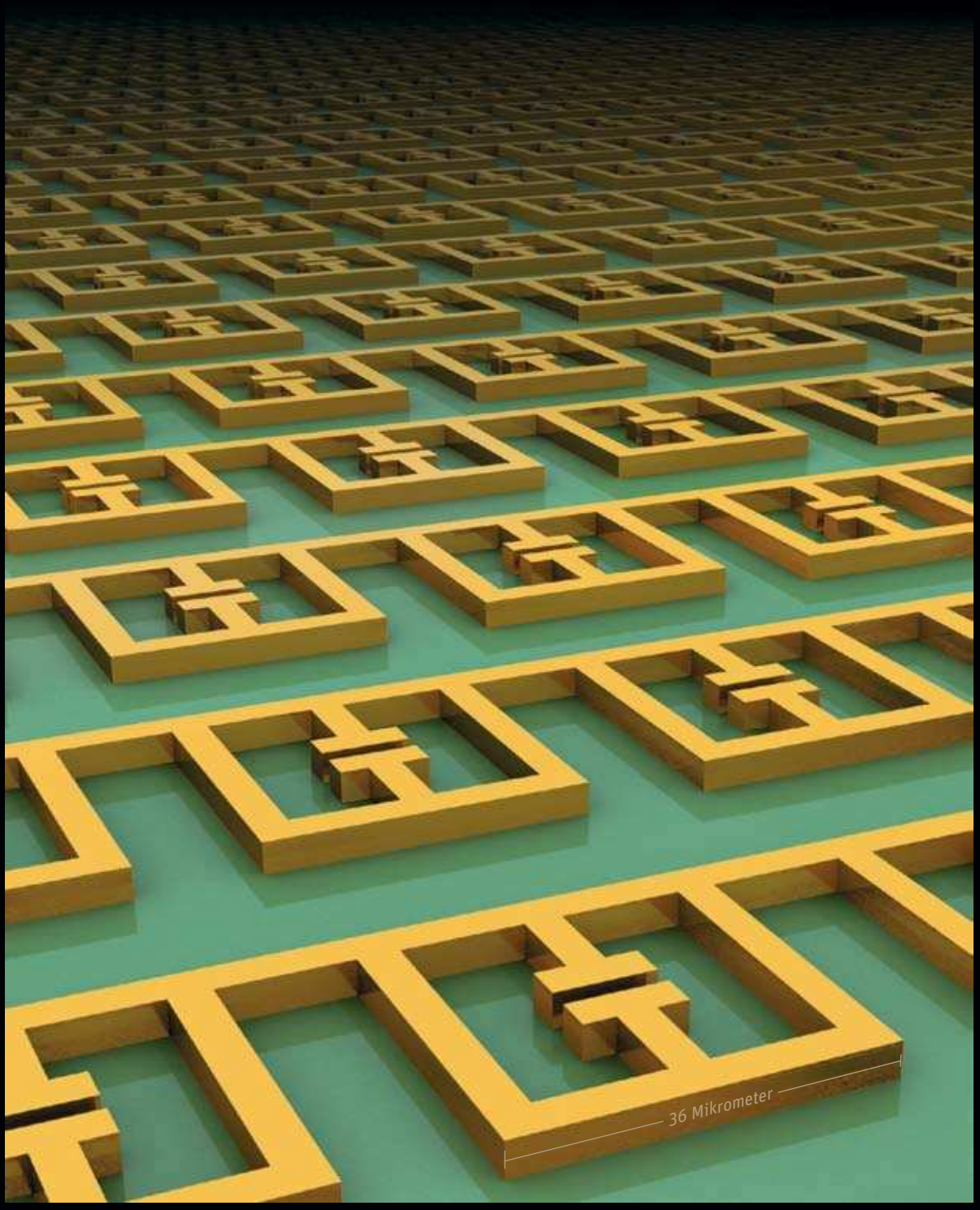
Über drei bis fünf Jahre hinweg steigerten die Forscher allmählich die Anzahl der Bilder. Bei den Pavianen waren es am Ende 6180, von denen einer der Affen immerhin achtzig Prozent mit der richtigen Taste assoziierte. Damit schien die Kapazität seines Gedächtnisses allerdings noch nicht erschöpft. Die zwei Tauben stießen dagegen bei 800 bis 1200 Bildern an die Grenze ihrer Merkfähigkeit. Eine erreichte am Ende bei 1978 Bildern eine Trefferquote von 67,6 Prozent. Beide Tierarten vergaßen ähnlich schnell und zögerten kurz, wenn sie sich unsicher über die richtige Antwort waren. Die Forscher schließen daraus, dass alle Wirbeltiere über ein ähnliches Gedächtnis verfügen; nur dessen Kapazität variiert.

Proceedings of the National Academy of Sciences USA, 14. 11. 2006, S. 17564

Mitarbeit: Emanuela Buyer und Stephanie Hügler

Goldenes Gitter

Terahertzstrahlen, die zwischen dem Radio- und Infrarotbereich liegen, wären ideal für Sensorik und Bildgebung. Aber bisher fehlt es an geeigneten Geräten; denn normale Werkstoffe taugen schlecht für die Interaktion mit solchen Strahlen. Einen Ausweg bieten Metamaterialien, die aus gitterartigen Anordnungen makroskopischer Strukturelemente bestehen. Im hier gezeigten Beispiel haben US-Forscher 36 Mikrometer große Spaltringresonatoren aus Gold auf einem Halbleiterchip aufgereiht. Über die angelegte Spannung lässt sich der Stromfluss durch den Spalt regulieren. Ist er unterbrochen, versetzen einfallende Terahertzstrahlen die Resonatoren in Schwingung und werden so absorbiert; anderenfalls können sie passieren. Damit fungiert das Gerät als Schalter für solche Strahlen.



VICENTE GARCIA / LOS ALAMOS NATIONAL LAB

WAFFENTECHNIK Diesen Artikel können sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Kims nuklearer Blindgänger

Mit seinem Atomtest Anfang Oktober wollte Nordkorea beweisen, dass es über Mittel und Know-how zur Zündung eigener Atombomben verfügt. Doch die Demonstration entpuppte sich als halber Fehlschlag.

Von Graham P. Collins

Schon kurz nach der Behauptung Nordkoreas, einen unterirdischen Atomtest durchgeführt zu haben, stellten Experten fest, dass die Detonation ungewöhnlich schwach war. Die Sprengkraft von Nuklearexplosionen wird in Kilo- oder Megatonnen angegeben – dem Äquivalent der Energie, die bei der Explosion der entsprechenden Menge TNT freigesetzt würde. Typischerweise erreichen die ersten Atomversuche eines Landes Stärken zwischen fünf und zwanzig Kilotonnen. So betrug die Sprengkraft beim »Trinity«-Test der USA 1945 fast zwanzig Kilotonnen. Die Schätzwerte für den nordkoreanischen Versuch bewegten sich dagegen im Bereich von gerade einmal einer halben Kilotonne. Angeblich hatten offizielle nordkoreanische Stellen den Chinesen einen Vier-Kilotonnen-Test angekündigt.

Einige Kommentatoren argwöhnten sofort, es habe sich vielleicht gar nicht um eine Nuklearexplosion gehandelt. 500 Tonnen konventionellen Sprengstoff in einer Weise zu zünden, dass die Erschütterung so abrupt einsetzt, wie es die seismischen Signale anzeigten, wäre allerdings gleichfalls eine enorme technische Leistung gewesen.

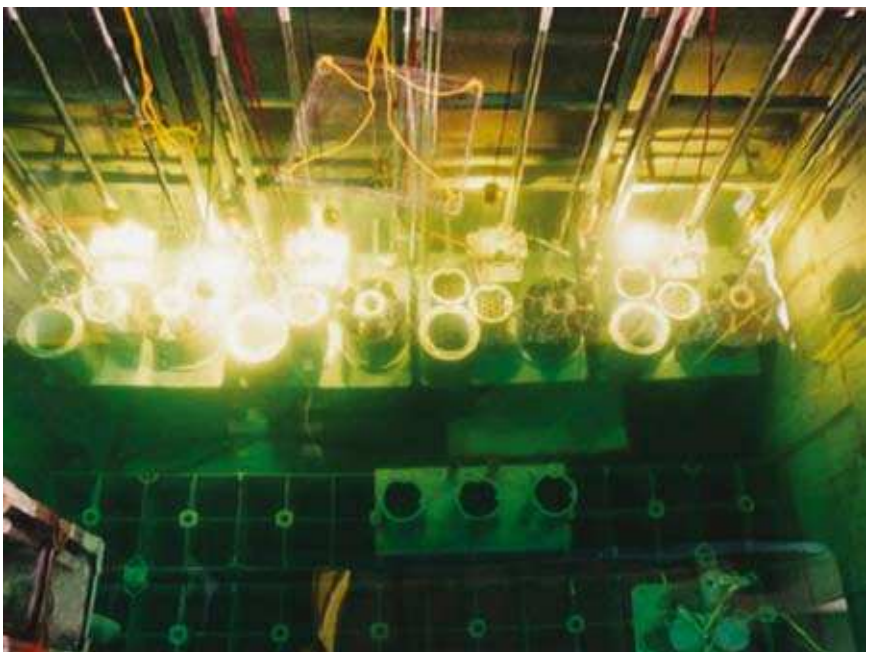
In jedem Fall bestätigten Luftproben zwei Tage nach dem Ereignis den nuklearen Charakter der Explosion. Zu den verräterischen Spuren gehörten insbesondere radioaktive Isotope des Edelgases Xenon, das bei der Kernspaltung entsteht. Auch bei einem unterirdischen Test diffundiert es binnen kurzem bis zur Erdoberfläche.

Nur ein Knallfrosch

Demnach hat Nordkorea tatsächlich eine Atombombe gezündet. Das Ergebnis war allerdings nur eine Art nuklearer Knallfrosch statt des beabsichtigten Böllers. Irgend etwas muss am 9. Oktober schief gelaufen sein. Aber was? Die Antwort hängt von der Art des verwendeten Spaltmaterials ab. Höchstwahrscheinlich handelte es sich um Plutonium (wie bei Trinity und der Nagasaki-Bombe) und nicht um Uran (wie in Hiroshima). Nordkorea verfügt über reichlich Plutonium. Von der Fähigkeit, größere Mengen nuklearwaffentaugliches Uran anzureichern, scheint es dagegen noch weit entfernt.

Vermutlich verfügte Nordkorea schon 1989 über genug Plutonium für eine Atombombe. Damals fuhr es seinen Forschungskernreaktor in Yongbyon für einige Monate herunter. In dieser Zeit könnte der kommunistische Staat die Brennstäbe entnommen haben, um das Plutonium zu extrahieren und aufzuarbeiten. Ein Abkommen zwischen der Clinton-Regierung und Nordkorea beendete 1994 die Gewinnung des waffenfähigen Materials und sah Vor-Ort-Inspektionen vor. Trotzdem startete das Regime von Kim Jong Il 1998 ein Programm zur Anreicherung von Uran. Vier Jahre später kündigte Nordkorea das Abkommen mit den USA einseitig auf und begann erneut damit, aus Brennstäben in Yongbyon Plutonium zu gewinnen.

Plutoniumbomben können auf verschiedene Arten versagen. Die erste hängt damit zusammen, dass zum Zünden eine Implosion nötig ist. Diese muss extrem symmetrisch erfolgen, um eine optimale Detonation zu erreichen. Typischerweise umgibt man eine Plutoniumkugel (den »Kern«) mit einer Mischung aus schnellen und langsamen konventionellen Sprengstoffen. Diese Mixtur müssen die Ingenieure so komponieren, formen und anordnen, dass bei ihrer Zündung eine exakt kugelförmige Stoßwelle entsteht, die das Plutonium auf das



AP PHOTO

Abgebrannte Brennstäbe aus dem Kernreaktor in Yongbyon lieferten wahrscheinlich das Plutonium für Nordkoreas ersten Atomtest.

AP PHOTO, KATSUMI KASAHARA

Möchtegern-Nuklearkrieger: Für Nordkoreas Diktator Kim Jong Il war der erste Atomtest seines Landes trotz offensichtlicher technischer Probleme ein propagandistischer Erfolg.

Doppelte bis Fünffache seiner normalen Dichte zusammenpresst. Als Folge davon wird das Spaltmaterial überkritisch, wodurch eine nukleare Kettenreaktion in Gang kommt, die zur Explosion führt. Je höher die Dichte des Plutoniums, desto heftiger die Detonation.

Selbst kleinste Abweichungen von der Kugelsymmetrie – etwa wenn die Stoßfront auf einer Seite um nur 0,1 Millisekunden nachhinkt – beeinträchtigen die Sprengkraft bereits erheblich. Der Plutoniumkern weicht dann dorthin aus, wo die Druckwelle schwächer ist oder später ankommt. Selbst wenn er immer noch zum größten Teil superkritisch wird, verformt er sich und expandiert so schnell wieder, dass die Kettenreaktion vorzeitig abbricht.

Eine andere denkbare Ursache für den Fehlschlag könnte sein, dass das Spaltmaterial mit einigen Prozent des Isotops Plutonium-240 verunreinigt war. In den Brennstäben von Kernreaktoren entsteht zwar zunächst das gewünschte Plutonium-239, aber je länger sie im Reaktor bleiben, desto mehr davon wandelt sich in das schwerere Isotop um. Dieses emittiert pro Zeiteinheit 10000mal so viele Neutronen. Letztere sind zwar entscheidend für das Zustandekommen einer nuklearen Kettenreaktion. Zu viele von ihnen zu Beginn der Implosion lassen den Plutoniumkern jedoch explodieren, bevor er genügend komprimiert ist. Die Explosion fällt entsprechend schwächer aus.

Was genau am 9. Oktober nahe P'unggye geschah, wissen vermutlich nur die Wissenschaftler von Kim Jong Il. Der politischen Wirkung des Atomtests hat seine mangelnde Sprengkraft ohnehin nicht geschadet.

Graham P. Collins ist Redakteur bei Scientific American.

SEISMOLOGIE

Erdbeben der anderen Art

Der Fall Nordkorea bewies: Selbst schwache unterirdische Atomtests lassen sich heute sicher nachweisen.

Von Sarah Simpson

Am 9. Oktober 2006 registrierten Seismometer weltweit eine Erschütterung der Magnitude 4,2 im nordöstlichen Nordkorea. Eigentlich nichts Besonderes: Im Mittel ereignen sich auf der Erde pro Tag zwanzig Erdbeben dieser oder höherer Stärke. Ohne die Ankündigung eines Nukleartests durch Nordkorea hätten die Seismologen den Ursprung des Ereignisses deshalb wohl nicht so schnell erkannt.

Obwohl den Seismogrammen Art und Stärke der Explosion nicht eindeutig zu entnehmen war, ging daraus doch eines klar hervor: Es war mehr ein Pups als ein Knall. Vielleicht noch wichtiger – der Vorfall demonstrierte, dass sich bei bekannter Geologie der Region mit lokalen Seismometern selbst schwache Detonationen eindeutig von Erdbeben unterscheiden lassen.

Der Theorie nach sollten Explosionen ein deutlich anderes Wellenmuster erzeugen als seismische Erschütterungen. Der plötzliche Druckstoß in alle Richtungen, der von ihnen ausgeht, verursacht longitudinale Wellen, die als Primär- oder kurz P-Wellen bezeichnet werden. Wenn sie am Seismometer ankommen, rufen sie heftige Ausschläge hervor, die allmählich abklingen. Nach einiger Zeit folgen die transversalen Sekundär- oder S-Wellen, die von Scherbewegungen herrühren. Sie lassen die Nadel zwar wieder stärker zittern, doch erreicht das neuerliche Auf und Ab nicht mehr die ursprüngliche Intensität.

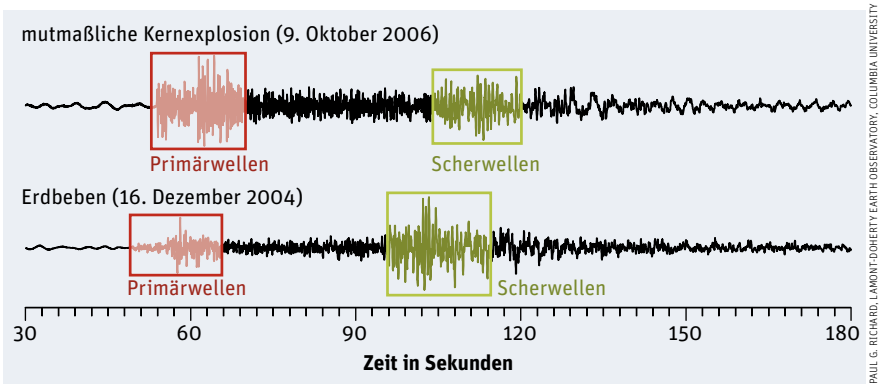
Seismische Signaturen

Nicht so bei Erdbeben. Auch hier kommen zwar zunächst P-Wellen an. Sie sind jedoch vergleichsweise schwach. Die stärkeren Ausschläge verursachen in diesem Fall die langsameren S-Wellen. Das liegt daran, dass bei Erdstößen zwei Krustenblöcke ruckartig aneinander entlanggleiten, wobei sich wesentlich größere Scher- als Druckkräfte entwickeln.

Explosionen würden von sich aus sogar überhaupt keine S-Wellen hervorrufen. Unterirdische Detonationen können jedoch Verschiebungen im umgebenden Gestein auslösen, die ihrerseits Rutschungen gleichen, wie sie bei Erdbeben auftreten. Laut Francis T. Wu von der Universität Binghamton (US-Bundesstaat New York) geschieht das vor allem in Regionen, wo sich bereits Spannungen in der Erdkruste aufgebaut haben.

Außerdem können sich P- in S-Wellen verwandeln, wenn sie auf Verwerfungen stoßen oder die Grenzfläche zwischen weichem Sediment und hartem Felsuntergrund passieren. Einige geologische Strukturen – etwa solche aus vulkanischem Tuff oder teilweise geschmolzenem Gestein – dämpfen die normalerweise intensiven S-Wellen eines Erdbebens oder blockieren sie völlig. So kann fälschlich der Eindruck einer Explosion entstehen.

Um solche Irrtümer zu vermeiden, müssen Geophysiker gewöhnlich die Aufzeichnungen von Seismografen an vielen verschiedenen Orten vergleichen, zu denen die Wellen auf jeweils anderen ▷



PAUL G. RICHARD, LAMONT-DOHERTY EARTH OBSERVATORY, COLUMBIA UNIVERSITY

Das Seismogramm einer Kernexplosion unterscheidet sich deutlich von dem eines Erdbebens. Es setzt mit starken longitudinalen Primärwellen ein, die vom Druckstoß herrühren. Die nachfolgenden Sekundärwellen, die mit Scherbewegungen einhergehen, sind dagegen vergleichsweise schwach. Bei Erdbeben verhält es sich genau umgekehrt.

Wegen gelangt sind. »Man braucht Erfahrungen darüber, wie die Erschütterungen eines bestimmten Bebenherds an den einzelnen Stationen in Erscheinung treten«, sagt Paul G. Richards vom Lamont-Doherty Earth Observatory der Columbia-Universität in New York.

Um Nordkoreas behaupteten Atomtest zu verifizieren, stützten sich viele Experten auf die Messungen einer seismischen Messstelle in Mudanjiang in China. Etwa 330 Kilometer nordöstlich des Explosionsorts gelegen, empfing sie unter den 128 Stationen des globalen seismografischen Netzwerks das klarste Signal. Richards und sein Kollege Won-Young Kim verglichen Aufzeichnungen der Detonation vom 9. Oktober und früherer Explosionen aus derselben Gegend mit den Seismogrammen ähnlich starker lokaler Erdbeben. Dabei erkannten sie systematische Unterschiede. Demnach kann zum Nachweis einer Explosion das Seismogramm einer einzigen Station im Umkreis von einigen hundert Kilometern genügen, sofern man genau weiß, wie sich die verschiedenen Arten

KRISTALLOGRAFIE Diesen Artikel können sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Computer entdeckt neue Welten

Die Struktur von Materialien verrät viel über deren Eigenschaften. Wenn Experimente versagen, lässt sie sich mit einem neuen Programm auch per Computer ermitteln. Dadurch wissen wir jetzt, welch ausgefallene Strukturen manche Feststoffe unter hohem Druck annehmen.

Von Colin W. Glass

Verhalten ändert sich unter Druck – auch bei Materialien. Man denke nur an Graphit, der sich bei einigen Gigapascal (zehntausend Bar) in Diamant umwandelt. Beide Stoffe bestehen aus reinem Kohlenstoff, haben aber völlig verschiedene Eigenschaften.

Das Verhalten von Materialien unter Druck zu ermitteln kann also ausgesprochen spannend sein. Bestimmt wird dieses Verhalten letztendlich von den Grundbausteinen unserer Welt, also den Atomen. Im festen Aggregatzustand ordnen sie sich – mit wenigen Ausnahmen – in einem ganz bestimmten, periodischen Muster an und bilden somit eine Struktur. Wie diese genau aussieht, hängt von der Art und dem Mischungsverhältnis der Atome sowie den äußeren Bedingungen wie Druck und Temperatur ab.

Weil die Struktur periodisch ist, reicht zu ihrer Beschreibung – wie bei einem Fliesenboden – ein winziger Teil, der sich in allen Richtungen identisch wiederholt. Materialforscher sprechen von einem Gitter. Sehr viele Eigenschaften eines Materials lassen sich eindeutig aus seiner inneren Struktur bestimmen. Sie ist der Informationsträger schlechthin in der Materialwissenschaft.

Es gibt eine Reihe von Methoden, um Strukturen zu bestimmen. Beim bekanntesten und erfolgreichsten Verfahren wird Röntgenstrahlung an einem Kristall gestreut. Anhand des Beugungsmusters lässt sich dann das Gitter erschließen. Diese experimentelle Methode setzt aber voraus, dass eine kristalline Probe des zu untersuchenden Materials bestrahlt werden kann. Unter sehr hohem Druck ist das schwierig. Deshalb erreichen Streuversuche hier oft nicht die nötige Präzision. Und manchmal interessieren sich Forscher auch für das Verhalten von Materialien unter Bedingungen, wie sie etwa im Innern von Riesenplaneten herrschen. Die extremen Druckverhältnisse dort aber sind in keinem irdischen Labor realisierbar.

Suche nach dem tiefsten Tal

In solchen Fällen sollte der Computer weiterhelfen können, indem er berechnet, zu welchem Gitter sich die Atome höchstwahrscheinlich zusammenlagern werden. Die in der Natur zu erwartenden Strukturen sind thermodynamisch stabil, haben also die geringstmögliche »freie Energie« – eine Größe, die auch Entropieeffekte einschließt, in denen sich eine Tendenz zur Zunahme der Unordnung ausdrückt. Die Aufgabe lautet folglich, unter den jeweiligen Bedingungen die Struktur zu finden, deren freie Energie minimal ist.

Das klingt nach einem einfachen Optimierungsproblem, ist in Wahrheit je-

▷ von Bodenerschütterungen dort manifestieren. »Bisher war das nur eine Vermutung«, sagt Richards. »Jetzt haben wir einen direkten Beleg.«

Um einiges schwieriger ist es allerdings, anhand von Seismogrammen die von einer Bombe freigesetzte Energie zu messen. Je nach den geologischen Verhältnissen sind im Extremfall Abweichungen um das Zehnfache möglich. Eine Explosion am früheren sowjetischen Atomtestgelände in Zentralasien, die eine Erschütterung der Magnitude 4,2 auslöst, hätte eine Sprengkraft von einer halben Kilotonne. Im Westen der USA, wo die von Störungen durchsetzten Gesteine die Wellen sehr stark dämpfen, entspräche der gleichen Erschütterung dagegen eine Stärke von 2,2 Kilotonnen.

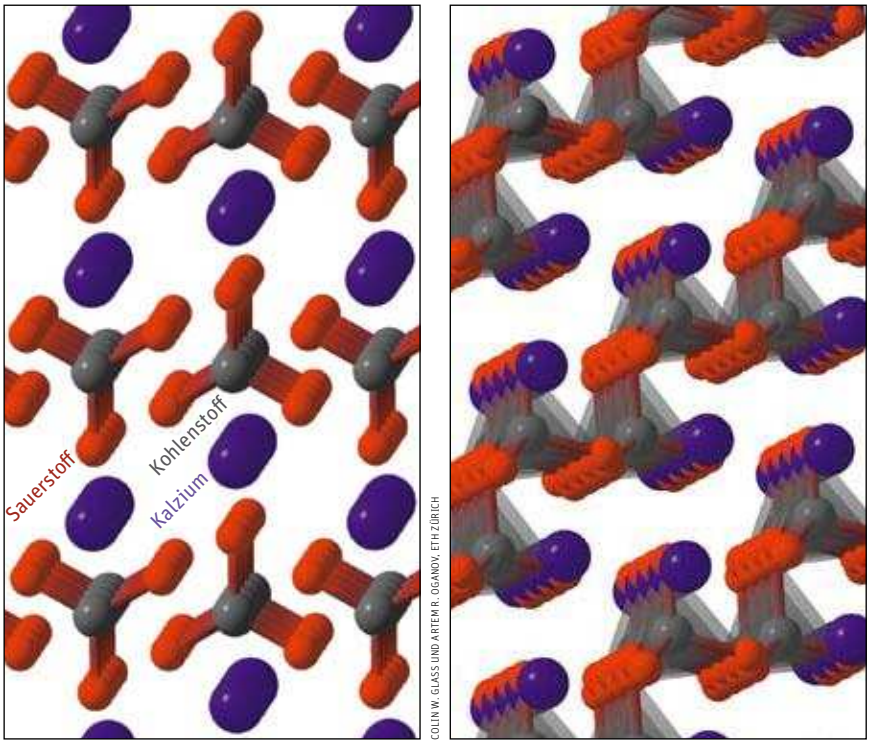
Dennoch ist sich Richards sicher, dass die Sprengkraft von Nordkoreas Nuklearexplosion weniger als eine Kilotonne betrug. Die Geologen kennen den Untergrund des Landes nämlich ziemlich genau und wissen so, dass er großenteils aus sehr hartem Gestein wie Granitgneiss besteht, das seismische Wellen effizient leitet.

Heimlicher Atomtest im Iran?

Anders verhält es sich laut Richards beim nach Atomwaffen strebenden Iran. Wie im Westen der USA gibt es hier auch intensive tektonische Aktivität. Dadurch breiten sich seismische Wellen in dem Land deutlich schlechter aus als in Nordkorea. Hinzu kommen die viel häufigeren Erdbeben. Bei Bodenerschütterungen im Iran dürfte es deshalb erheblich schwerer fallen, die Seismogramme richtig zu deuten.

Im Kalten Krieg entgingen den Vereinigten Staaten immerhin 26 der 366 unterirdischen Atomtests, welche die Sowjetunion in Zentralasien durchführte. Bei den meisten davon lag die Sprengkraft unter einer Kilotonne, sodass sie nur von lokalen Stationen identifizierbar waren. Im Nahen Osten würden solche Explosionen heute dagegen nicht mehr unbemerkt bleiben. Dafür sorgt das dichte Seismometernetz, das dort zum Nachweis von Erdbeben installiert wurde. Hinzu kommen weltweit mehr als 170 Stationen, welche die Organisation zur Überwachung des Vertrags über das umfassende Verbot von Nuklearversuchen betreibt. All das dürfte den Iran und andere Kernwaffenaspiranten zwar nicht abschrecken, macht einen heimlichen Atomtest aber äußerst unwahrscheinlich.

Sarah Simpson ist Redakteurin bei Scientific American.



COLIN W. GLASS UND ARTEM R. OGANOV, ETH ZÜRICH

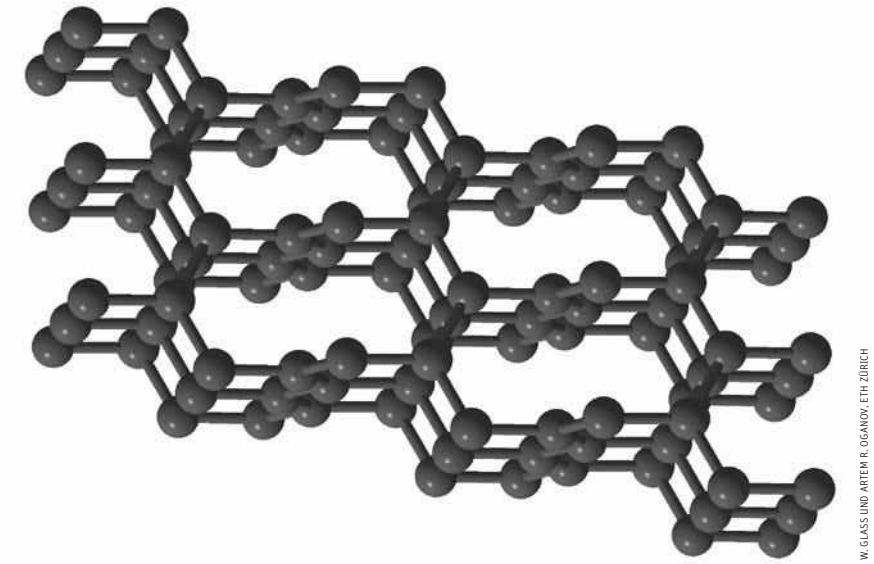
Bei einem Druck von 42 bis 137 Gigapascal im Erdinneren hat Kalk eine besondere Struktur (links). Sie konnte kürzlich per Computer berechnet werden – mit einem Programm namens Uspex, das Prinzipien der Evolution nachahmt. Bei noch höherem Druck sitzt der Kohlenstoff der Karbonatgruppe nicht mehr, wie üblich, im Zentrum eines Dreiecks, sondern inmitten eines Tetraeders aus Sauerstoffatomen (rechts).

doch äußerst kompliziert. Denn gesucht wird das globale Minimum einer Energielandschaft, die sich über so viele Dimensionen erstreckt, wie Variable zur Beschreibung eines Gitters benötigt werden. Das sind jeweils drei Koordinaten pro Atom und sechs so genannte Formparameter für das Gitter selbst. Außerdem ist das globale Minimum nicht etwa der Boden eines von den Rändern der Energielandschaft gleichförmig abfallenden Trichters, sondern der tiefste Punkt in einem verschlungenen Gebirge mit vielen Anhöhen und Tälern, das unzählige lokale Minima enthält. Deshalb hatten alle Versuche, Strukturen von Festkörpern per Computer zu berechnen, bisher nur wenig Erfolg.

Zusammen mit Artem R. Oganov habe ich am Laboratorium für Kristallografie der ETH Zürich nun jedoch eine neue Optimierungsmethode namens Uspex *(universal structure predictor: evolutionary xtallography)* entwickelt, welche an die genannten Schwierigkeiten angepasst ist. Sie basiert auf einem evolutionären Algorithmus, ahmt also den biologischen Evolutionsprozess nach.

Als Ausgangspunkt dient eine zunächst frei gewählte »Population« von Gittern. Für jedes Einzelne ermittelt der Computer die »Fitness«, indem er quantenmechanisch seine freie Energie berechnet. Dabei handelt es sich um die potenzielle Energie, die sich aus den Wechselwirkungen der beteiligten Atome und Elektronen ergibt.

Dann folgt die Selektion. Das Drittel der Gitter mit den schlechtesten Werten wird verworfen. Der Rest dient als Grundlage zur Erzeugung einer neuen Population. Dabei wird eine Struktur umso stärker berücksichtigt, je niedriger ▷



COLIN W. GLASS UND ARTEM R. OGANOV, ETH ZÜRICH

Diese neue Kohlenstoffmodifikation sollte bei Atmosphärendruck synthetisierbar sein. Die Kohlenstoffatome sitzen darin in der Mitte von Dreiecken wie auch von Tetradern. Charakteristische Strukturmerkmale von Graphit und Diamant sind demnach miteinander vereint.

▷ ihre freie Energie ist. Die Konstruktion neuer Gitter erfolgt durch Mutation oder Vererbung. Im ersten Fall verzerrt das Programm die Form des Gitters und verschiebt dadurch auch die Atome oder es tauscht Atome gegeneinander aus. Bei der Vererbung wird von zwei Gittern je ein Teil genommen und zu einem »Zwitter« zusammengefügt.

Mit der jeweils neuen Population als Ausgangspunkt wiederholt der Algorithmus diese Schritte in einem Kreisprozess so lange, bis sich keine Verbesserung mehr ergibt. Er zoomt sich so gleichsam an das globale Minimum heran. In zahlreichen Tests mit bekannten Strukturen erwies sich, dass Uspex ein nie da gewesenes Maß an Zuverlässigkeit und Effizienz erreicht.

Mit diesem Instrument an der Hand konnten wir nun also beginnen, das Verhalten verschiedenster Materialien – darunter Elemente und Minerale – unter hohem Druck zu erforschen. Teilweise bekräftigten unsere Resultate bisherige Vermutungen. Zum Teil fanden wir aber auch völlig neue Strukturen, mit denen niemand gerechnet hatte. Hier möchte ich einige besonders interessante Entdeckungen vorstellen.

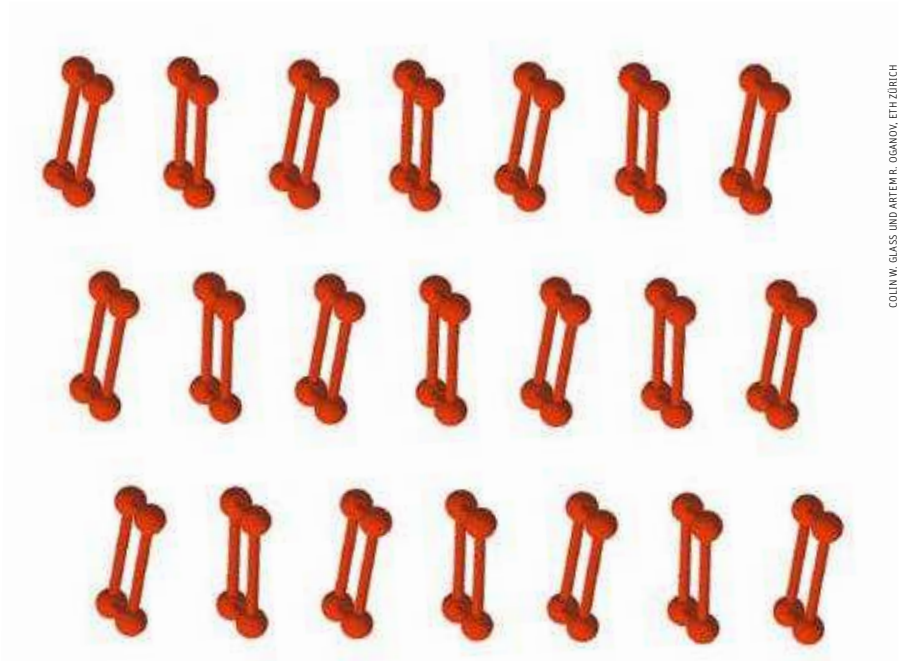
Kohlenstoff im Erdinnern

Kalk oder chemisch Kalziumkarbonat ($CaCO_3$) ist einer der Hauptträger von Kohlenstoff im Inneren der Erde. Welche Struktur er unter dem hohen Druck in der Tiefe annimmt, war bisher allerdings unbekannt. Shigeaki Ono vom Institut für die Erforschung der Erdevolution in Kanagawa (Japan) hatte zwar das Röntgenbeugungsmuster des Gitters aufgenommen, das sich bei einem Druck von 42 bis 137 Gigapascal bildet. Es war ihm jedoch nicht gelungen, daraus die genaue Anordnung der Atome abzuleiten. Die Lösung fand unser Programm: Es errechnete eine Struktur, die hervorragend zu den Beugungsdaten passte. Außerdem fanden wir eine weitere stabile Modifikation, die bei einem Druck von mehr als 137 Gigapascal auftritt. Ono konnte sie nachträglich durch Röntgenbeugung verifizieren.

Momentan arbeiten wir an den Hochdruckstrukturen von Magnesiumkarbonat und glauben, sie gefunden zu haben. Magnesium- und Kalziumkarbonat bergen zusammen den weitaus größten Teil des Kohlenstoffs im Erdinneren. Die Kenntnis ihres Verhaltens unter hohem Druck sollte deshalb zu einem besseren Verständnis des globalen Kohlenstoffzyklus beitragen.

Außerdem wirft das Kristallgitter von Kalziumkarbonat bei mehr als 137 Gigapascal ein neues Licht auf das chemische Verhalten von Kohlenstoff: Üblicherweise bildet er mit drei Sauerstoffatomen einen Mercedes-Stern; hier sitzt er dagegen im Zentrum eines Tetraeders.

Astronomen schreiben die Magnetfelder von Jupiter und Saturn dem Wasserstoff zu, aus dem die beiden Planeten hauptsächlich bestehen. Unter dem gewaltigen Druck im Innern dieser Himmelskörper liegt dieses Element in metallischer Form vor. Welche Struktur es dabei hat, ist unklar. Davon hängt jedoch die elektrische Leitfähigkeit und somit das magnetische Feld ab. Es wird vermutet, dass metallischer Wasserstoff bis zu einem Druck von 500 Gigapascal noch aus denselben zweiatomigen Molekülen besteht wie im gasförmigen und flüssigen Zustand und erst danach eine



COLIN W. GLASS UND ARTEM R. OGANOV, ETH ZÜRICH

Unter hohem Druck geht Sauerstoff in einen roten Festkörper über. Röntgenbeugungsdaten deuten darauf hin, dass darin Paare von O_2-Molekülen vorliegen. Berechnungen mit Uspex ergaben eine dazu passende Struktur. Sie reproduziert die experimentellen Daten besser als alle früher vorgeschlagenen Modelle.

Modifikation annimmt, die nur noch Einzelatome enthält. Unseren ersten Resultaten zufolge bleiben die Moleküle jedoch bis mindestens 600 Gigapascal erhalten – und wahrscheinlich noch einiges darüber hinaus.

Auch Sauerstoff, der im Gaszustand in Form von O_2-Molekülen vorliegt, durchläuft unter Druck einige interessante, experimentell beobachtete Phasenumwandlungen. Dabei treten eine rote und eine supraleitende Modifikation auf. Deren Strukturen waren trotz jahrzehntelanger Untersuchungen bisher nicht bekannt. Bei rotem Sauerstoff wurde vermutet, dass er aus Zickzackketten von zweiatomigen Sauerstoffmolekülen besteht. Das deckt sich mit dem, was wir als stabilstes Kristallgitter beim absoluten Temperatur-Nullpunkt (–273,16 Grad Celsius) gefunden haben.

Allerdings ist es nicht mit dem gemessenen Röntgenbeugungsmuster vereinbar. Aus ihm schließen Kristallographen vielmehr auf eine Struktur, die auf Paaren von O_2-Molekülen basiert. Solch ein Kristallgitter hat auch unser Programm errechnet. Beim absoluten Temperatur-Nullpunkt ist es zwar geringfügig weniger stabil als das mit den Zickzackketten, reproduziert die bei Raumtemperatur gemessenen Beugungsdaten jedoch wesentlich besser. Dieses Gitter ist bislang einzigartig.

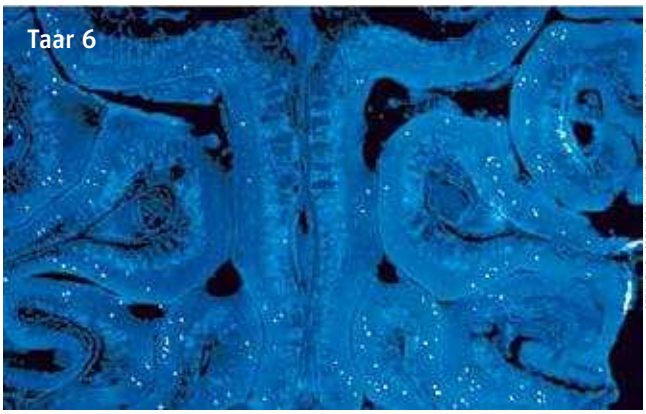
Bei einem Druck von mehr als 96 Gigapascal wird Sauerstoff schließlich supraleitend. Unsere Berechnungen mit Uspex bestätigten die bisherige Vermutung, dass er dabei molekular bleibt. Allerdings zeichnet sich die gefundene Struktur durch eine dreidimensionale Vernetzung der O_2-Moleküle aus.

Fundgrube für neue Werkstoffe

Doch nicht nur stabile Strukturen sind von Interesse. Als Beleg kann der eingangs erwähnte Diamant dienen. Thermodynamisch ist er unter Atmosphärendruck nicht beständig, sondern lediglich »metastabil«: Er sollte sich in Graphit umwandeln, tut das aber nur mit äußerst geringer Geschwindigkeit, weil er dazu erst eine sehr hohe Energiebarriere überwinden muss. Da Uspex bei der Erkundung der Energielandschaft zahlreiche Täler findet und durchsucht, entdeckt das Programm auch viele gute, metastabile Strukturen. Ist deren freie Energie – wie beim Diamant unter Atmosphärendruck – gering genug und sind die Barrieren zu energetisch günstigeren Atomanordnungen hinreichend hoch, sollten solche Materialien eine für die technische Anwendung ausreichende Lebensdauer haben.

Da wir aus den theoretisch ermittelten Strukturen viele Eigenschaften des zugehörigen Materials ableiten können, eröffnet sich die Möglichkeit, gezielt Systeme bestimmter chemischer Zusammensetzung per Computer nach technologisch interessanten Materialien zu durchforsten. Das haben wir etwa beim Kohlenstoff getan. Zu unserer großen Überraschung entdeckten wir dabei eine Modifikation mit sehr geringer freier Energie, die unter normalem Atmosphärendruck metastabil ist und Strukturelemente von Graphit und Diamant in sich vereint. Für diesen Zwitter sind einzigartige Kombinationen physikalischer Eigenschaften zu erwarten. Die Herausforderung an die experimentellen Chemiker ist nun, einen Weg zu finden, das bislang nur virtuell existierende Material auch real herzustellen.

Colin W. Glass ist Doktorand am Laboratorium für Kristallographie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich.



STEPHEN D. LIBERLES UND LINDA B. BUCK, NATURE BD. 442, S. 646

WAHRNEHMUNG Diesen Artikel können sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Ein neuer Geruchssinn

Mäuse haben eine »zweite Nase«. Damit riechen sie Signalstoffe im Urin ihrer Artgenossen.

Von Michael Groß

Die Wissenschaft weiß erstaunlich viel über unsere visuelle Wahrnehmung, aber ziemlich wenig über den Geruchs- und Geschmackssinn. Während das Auge der Wirbeltiere bis in seinen letzten Winkel ausgeleuchtet ist, können Forscher im Mund- und Nasenbereich noch grundlegende Entdeckungen machen – Überraschungen eingeschlossen.

So ist das System der molekularen Geruchsrezeptoren, ursprünglich am Beispiel der Maus untersucht, erst seit 15 Jahren bekannt. Entscheidenden Anteil an dieser grundlegenden Entdeckung hatte Linda S. Buck, die dafür 2004 den Medizin-Nobelpreis erhielt (Spektrum der Wissenschaft 12/2004, S. 22). Jetzt wartet die US-Forscherin erneut mit einer kleinen Sensation auf. Wie sie und ihr Mitarbeiter Stephen Liberles am Howard Hughes Medical Institute in Seattle (Washington) herausgefunden haben, existiert in der Nase der Nagetiere eine zweite, unabhängig operierende Familie von Duftrezeptoren *(Nature, Bd. 442, S. 645)*.

Das klassische Geruchssystem, das inzwischen auch bei vielen anderen Wirbeltieren untersucht ist, besteht aus den so genannten Riechzellen. Diese spezialisierten Neuronen befinden sich in der Riechschleimhaut im oberen Bereich des Nasendachs. Sobald sich ein passender Geruchsstoff anlagert, senden sie ein Signal an das Gehirn.

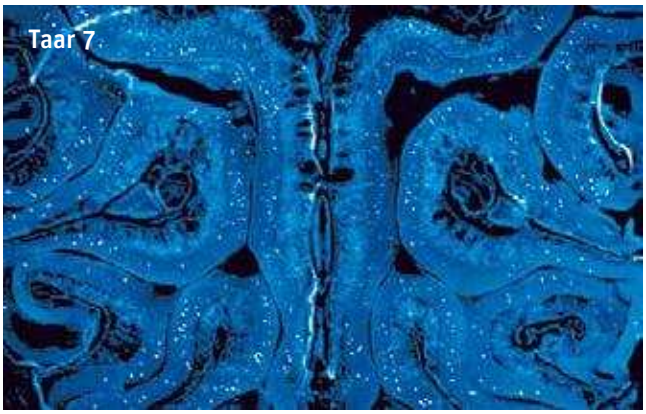
Auf molekularer Ebene gibt es – je nach Tierart – bis zu tausend verschiedene Rezeptormoleküle für duftende Substanzen. Jede einzelne Riechzelle verfügt jedoch nur über eine einzige Sorte davon und registriert folglich ausschließlich Moleküle, die sich daran binden. Durch kombinatorische Verknüpfung dieser spezialisierten Sensoren können Tiere zwischen Millionen von Gerüchen unterscheiden. Beim Menschen, der sich in den letzten Jahrmillionen auf andere Kommunikationskanäle spezialisiert hat, ist diese Fähigkeit allerdings stark verkümmert.

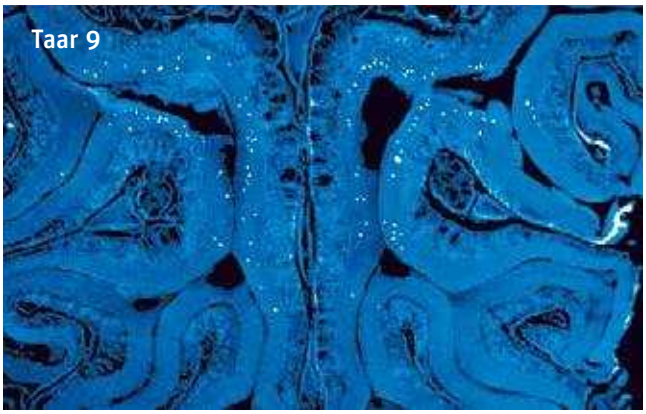
Die Rezeptormoleküle gehören zu einer riesigen Stofffamilie, die auch das Sehpigment Rhodopsin und alle bisher bekannten Geschmackssensoren umfasst. Sie leiten die empfangene Botschaft in biochemischer Form an ein an derselben Zellmembran angesiedeltes G-Protein weiter, weshalb sie G-Protein-gekoppelte Rezeptoren heißen. Über eine Kaskadenreaktion wird das Signal dann um mehrere Größenordnungen verstärkt.

Im Endeffekt öffnen oder schließen sich unzählige Ionenkanäle – was die charakteristische Spannungsänderung erzeugt, die einen Nervenimpuls ausmacht. Dieser Vorgang ist vor allem am Beispiel des Sehprozesses und der Hormonantwort im Detail untersucht worden. Er erklärt, warum schon ein einziges Lichtquant (Photon) oder Hormonmolekül jene synchronen Schaltvorgänge in Tausenden von molekularen Schleusen auslösen kann, die eine Nervenzelle zum Feuern veranlassen.

MONELL CHEMICAL SENSES CENTER, JAMES KILKELLY

Aus Dressurversuchen ist schon länger bekannt, dass Mäuse Signalstoffe im Urin von Artgenossen erschnüffeln können. Nun wurden Geruchsrezeptoren entdeckt, die an diesem Wahrnehmungsvorgang beteiligt sind.





Diese vier Schnitte durch die Riechschleimhaut der Maus illustrieren die Verteilung von vier der fünfzehn neu entdeckten Geruchsrezeptoren (Taar). Zellen, in denen sie vorliegen, leuchten weiß.

Die Mitglieder der einzigen bis vor Kurzem bekannten Familie von Geruchsrezeptoren sind alle auf flüchtige Duftstoffe spezialisiert und leiten ihr Signal an das für den Geruchssinn spezifische G-Protein namens $G\alpha_{olf}$ weiter. Eine Reihe von Beobachtungen und Überlegungen ließen Buck und Liberles jedoch vermuten, dass dies noch nicht die vollständige Inventarliste des Geruchssinns sein kann. Zum Beispiel gibt es Riechzellen, die kein $G\alpha_{olf}$ herstellen. Damit sie ihre Aufgabe erfüllen können, müssen sie also mit Geruchssensoren aus einer anderen Familie arbeiten. Des Weiteren sprach einiges dafür, dass Riechzellen außer den flüchtigen Duftstoffen weitere Substanzen wahrnehmen können: etwa die für die immunbiologische Identität eines Individuums charakteristischen Peptide sowie Pheromone (Sexuallockstoffe). Für Letztere ist eigentlich das in der Nasenscheidewand angesiedelte vomeronasale Organ (VNO) zuständig, doch zumindest bei einigen Pheromonen scheinen beide Teile der Nase an der Wahrnehmung beteiligt zu sein.

Deshalb fahndeten die US-Forscher nach weiteren Sinnesrezeptoren in Mäuse-Riechzellen. Dazu separierten sie diese zunächst mit einem neu entwickelten Sortierverfahren von den anderen Zellen der Nasenschleimhaut. Dann suchten sie in den Riechzellen nach Abschriften von Genen für Sensormoleküle, von denen nicht schon bekannt war, dass sie an der Wahrnehmung von Gerüchen oder Pheromonen beteiligt sind.

Liberles und Buck entdeckten auf diese Weise zunächst zwei neue Typen. Beide gehören zur Familie der mit Spuren- ▷

Die Chancen früher begreifen.

Testen Sie Technology Review – 3 Hefte für 12 Euro!

- Lieferung bequem und pünktlich nach Hause
- Sie verpassen keine Ausgabe
- Sie sparen fast 15% gegenüber dem Kauf im Einzelhandel
- Bestellen Sie Ihr Schnupperabo unter **www.technologyreview.de/abo**

Möchten Sie Technology Review zum günstigen Abo-Preis (12 Hefte pro Jahr, für nur 4,96 Euro pro Ausgabe inkl. Versandkosten statt 5,80 Euro im Einzelverkauf) weiterlesen? Dann unternehmen Sie nichts. Sollten Sie das Magazin nicht weiter beziehen wollen, teilen Sie uns dies bitte spätestens 10 Tage nach Erhalt des 2. Heftes schriftlich mit.

3 x Technology Review lesen und Geschenk sichern!

Deutschlands Technologiemagazin.

▷ aminen assoziierten Rezeptoren (Taar für *trace amine-associated receptor*), die erst seit 2001 bekannt ist. Sie umfasst nach Erkenntnissen aus der Genomforschung bei der Maus 15, beim Zebrafisch 57 und beim Menschen nur sechs Mitglieder. Ihre nächsten Verwandten sind die Rezeptoren für Botenstoffe des Gehirns wie Serotonin und Dopamin. Deshalb hatte man diese Familie, deren genaue Funktion im Dunkeln lag, bisher der internen Kommunikation zugeordnet.

Nach den ersten Hinweisen auf die Beteiligung von Taars am Geruchssinn knöpften sich die Forscher die 15 Exemplare bei der Maus einzeln vor. Wie sich zeigte, kommen tatsächlich mindestens 14 von ihnen in Riechzellen vor. In anderen Geweben fand sich dagegen keine Spur davon – auch nicht im Gehirn, wo man sie bisher vermutet hatte.

Als Nächstes versuchten die Forscher daraufhin zu ermitteln, welche Duftstoffe die Mäuse mit ihren Taars erschnüffeln können. Nicht bei allen 15 Exemplaren hatten sie Erfolg, doch bei fünf konnten sie geeignete Geruchsmoleküle aufspüren, die sich nicht nur an den spezifischen Rezeptor binden, sondern auch in der lebenden Riechzelle die zugehörige Signalkette auslösen. Alle gehören zu den Aminen, also Molekülen, die eine bestimmte Stickstoff-Wasserstoff-Gruppe ($-NH_2$) enthalten.

Interessant ist, dass mindestens drei dieser Amine im Urin der Mäuse vorkommen, wo ihre Konzentration von dem Geschlecht und der sexuellen Reife des Tiers abhängt. Demnach dürfte die Funktion der neu aufgefundenen Geruchssensoren primär im Bereich des Sozial- und Sexualverhaltens liegen.

Die neue Entdeckung von Linda Buck erschließt, wie ein Kommentator in »Nature« schrieb, eine neue Dimension in der Welt der Geruchswahrnehmung. Aber es muss noch andere Dimensionen geben. Denn die Ausgangsfragen der Forscher haben die Taar-Moleküle nicht beantwortet. Auch sie senden ihre Signale an $G\alpha_{olf}$, genauso wie die traditionellen Riechmoleküle, und sie erkennen weder Pheromone noch immunologisch relevante Peptide. Die Suche nach weiteren molekularen Antennen des Geruchssinns bleibt also ein lohnendes Ziel.

Michael Gross ist promovierter Biochemiker und arbeitet als freier Wissenschaftsjournalist in Oxford (England).

Springers Einwürfe

Beim Geld hört die Freundschaft auf

Schon der Gedanke an Zaster weckt den Dagobert Duck in uns.

Knete, Kies, Kohle, Kröten, Piepen, Schotter, Zaster: Die gängigen Umschreibungen für das universelle Tauschmittel zeugen nicht eben von hoher Wertschätzung. Ganz anders der Thron, auf den es die moderne Wirtschaftswissenschaft setzt. Da ist Geld der oberste Regulator, der über den Marktpreis Ressourcen optimal zuweist, Angebot und Nachfrage perfekt regelt. Nach der reinen Lehre soll Geld die Welt möglichst allein regieren: Sobald Politiker dem freien Markt ins unsichtbare Handwerk pfuschen, verschulden sie bloß Inflation, Wirtschaftskrisen und Arbeitslosigkeit.

Erstaunlich, wie selten erforscht wurde, was die Allgegenwart dieser Substanz in den Köpfen ihrer Benutzer anrichtet, das heißt in jedem einzelnen von uns. Drei Marketing-Psychologinnen um Kathleen D. Vohs von der Universität von Minnesota in Minneapolis haben jetzt die Frage in neun ausgeklügelten Experimenten gründlich untersucht *(Science, Bd. 314, S. 1154)*.

Beispielsweise mussten die Teilnehmer zunächst zur Einstimmung Texte vorlesen; in der einen Probandengruppe handelte die Geschichte von einer Kindheit in finanziellem Überfluss, in der anderen vom Heranwachsen in Armut. Dann wurde den Probanden eine geometrische Aufgabe gestellt, die nicht nur schwierig, sondern – was sie nicht wussten – gar nicht zu lösen war. Nach zwei Minuten wurde Hilfe angeboten: Jemand trat ins Zimmer, der angeblich die Lösung wusste. Testpersonen, die zuvor mit der Reichtumsgeschichte konfrontiert worden waren, nahmen das Hilfsangebot deutlich später in Anspruch als jene, die über ein Oliver-Twist-Schicksal gelesen hatten. Letztere suchten nicht nur erheblich rascher Rat und Tat, sondern waren in einem ähnlichen Test auch eher bereit, anderen zu helfen.

In einem weiteren Versuch saßen die Teilnehmer vor Computern und beantworteten Fragebögen. Nach sechs Minuten erschienen Bildschirmschoner – im einen Fall Fische unter Wasser, im anderen langsam vorbeitreibende Geldscheine. Anschließend wurde ein Gruppengespräch angekündigt, für das die Probanden Stühle aufstellen sollten. Wer zuvor Geld auf dem Bildschirm gesehen hatte, stellte die Stühle merklich weiter auseinander. Solche Teilnehmer suchten buchstäblich mehr soziale Distanz.

Für die Psychologinnen lautet die Quintessenz ihrer Ergebnisse: Geld macht tendenziell eigenbrötlerisch und weniger kooperativ. Schon beim bloßen Gedanken daran werden Menschen weniger bereit, Hilfe in Anspruch zu nehmen und anderen beizustehen.

Die Resultate lassen das Image des Geldes in recht zwiespältigem Licht erscheinen. Geld verbindet nicht nur, sondern es trennt auch; es sozialisiert und individualisiert zugleich. Einerseits ist es seit mehreren tausend Jahren zum allgemeinsten Mittel des sozialen Austauschs geworden. Geldverkehr übergreift Kulturen, Traditionen und gesellschaftliche Schichten. In der modernen Weltgesellschaft wirkt Geld als kostbares, von den Währungshütern der Nationalbanken sorgsam gepflegtes Schmiermittel zum reibungslosen Interessenausgleich; bekanntlich wird sogar in halblegaler Weise gern »geschmiert«, um Transaktionen zu erleichtern.

Michael Springer

Doch auf der anderen Seite macht das soziale Gleitmittel offenbar nicht automatisch großzügig, kooperativ und spendabel, sondern fördert im Gegenteil eine egoistische Einstellung nach dem Motto: Jeder ist sich selbst der Nächste. Die antisoziale Kehrseite der Geldidee wirkt, wie die Experimente plastisch vorführen, hinterrücks und unbewusst. Der Glanz des Geldes wirft einen heimlichen Schatten, der den Gedanken an die Mitmenschen verdunkelt.

AUF DEN NÄCHSTEN SEITEN FOLGT EIN SONDERTEIL DER RWTH AACHEN ▷

1957

Filme fast live

»Während der photokina erlebte man erstmalig in Europa ein neues Filmverfahren, das dem Zuschauer die Illusion »dabeizusein« in ganz besonderem Maße vermittelt. Der Demonstrationsfilm beginnt mit Achterbahnszenen … Der visuelle Eindruck ist so stark, daß eine große Anzahl von Zuschauern den scheinbaren Bewegungen durch entsprechende Körperhaltungen folgte. Der Todd-AO-Film kommt mit nur einer Kamera, einem Filmstreifen und einem Projektor aus. Die Lösung des Problems ergab sich dadurch, daß es gelang, ein Aufnahmeobjektiv zu entwickeln, das den extremen Bildwinkel von 128° erfaßt und gleichzeitig eine hinreichende Lichtstärke besitzt.« *(Umschau Nr. 1, Jg. 57, S. 17, Januar 1957)*

Ein neues Breitbildverfahren versetzt die Zuschauer in den Film.

Bienen als Strahlungsdetektoren

»Strontium 90 findet sich in der Umgebung von Atomforschungsstätten sowie nach Atombombenexplosionen. Bienen besitzen nun die Eigentümlichkeit, daß sie Strontium in ihrem Körper sehr stark speichern … Mit Hilfe von Bienen läßt sich daher die radioaktive Verseuchung einer Gegend besonders gut nachweisen. Man will jetzt Bienenstöcke in der Nähe von Atomforschungsstätten mit Geigerzählern versehen und hofft mit deren Hilfe die radioaktive Aufladung der vom Flug zurückkehrenden Bienen und damit den Grad der radioaktiven Verseuchung der Atmosphäre bzw. des Bodens und der Pflanzenwelt kontrollieren zu können.« *(Umschau, Nr.1, Jg. 57, S. 24, Januar 1957)*

Kriegsopfer

»Auf Grund aller nunmehr verfügbaren Unterlagen sind die deutschen Bevölkerungsverluste des zweiten Weltkriegs vom Statistischen Bundesamt neu berechnet worden. Die Zahl der verstorbenen Angehörigen der Wehrmacht erreichte 3,76 Millionen. Die Verluste, die die Zivilbevölkerung des Deutschen Reiches … erlitten hat, sind mit fast einer halben Million zu veranschlagen. Hinzu kommen 1,3 Millionen Menschen, die die Bevölkerung der Ostgebiete des Deutschen Reiches auf der Flucht und bei der Vertreibung verloren hat. Unter den Deutschen, die in Gebieten jenseits der Reichsgrenzen wohnten, sind auf die gleiche Weise rund eine Million ums Leben gekommen.« *(Deutsche Medizinische Wochenschrift, Nr. 3, Jg. 82, S. 126, Januar 1957)*

Bakterien gegen Ratten

»In der bakteriologischen Anstalt der Landwirtschaftskammer für die Rheinprovinz in Bonn werden Bakterien hergestellt, die mit dem besten Erfolge zur Vernichtung von Ratten, Mäusen, Hamstern und Wühlmäusen angewendet worden sind. Die Erfolge in der Praxis haben die Vorzüglichkeit des Mittels erwiesen. Ein großer Vorzug des Mittels ist, daß es im Gegensatz zu den Giften gern genommen wird und für Menschen und Haustiere unschädlich ist. Die Kulturen können von der bakteriologischen Anstalt der Landwirtschaftskammer für die Rheinprovinz zu Bonn zu 1 Mark für das Röhrchen bezogen werden.« *(Beilage zur Allgemeinen Zeitung, Nr. 11, S. 87, Januar 1907)*

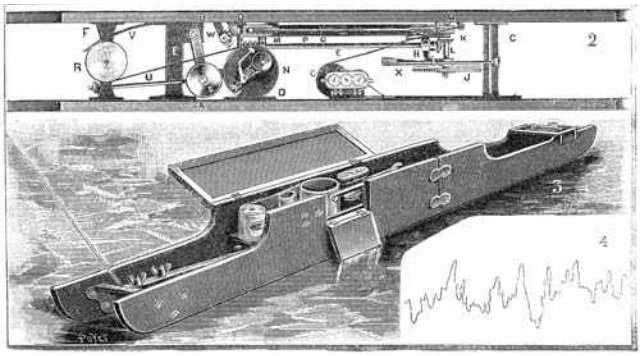
Ansteckungsgefahr Telefon

»Die Uebertragung von Krankheitserregern durch das Telephon ist nicht ausgeschlossen; eine solche kann stattfinden entweder durch Vermittelung des Mundstückes oder des Hörtrichters. Es sind nun zahlreiche Vorrichtungen angegeben worden, um die Uebertragung zu verhüten. Ein leistungsfähiges Verfahren stellt der Telephondesinfector dar, welcher im wesentlichen aus einer der Sprechmuschel oder dem Hörrohr aufsetzbaren und dieselben hermetisch abschließenden Nickelkapsel besteht, in deren Innern die Desinfectionsmasse in Tablettenform sich befindet. Eine Prüfung ergab, daß seine desinfectorischen Wirkungen durchaus zufriedenstellende sind.« *(Allgemeine Medicinische Central-Zeitung, Nr. 4, Jg. 76, S. 51, Januar 1907)*

1907

Straßenviagraph

»Mit dem Anwachsen des Automobilverkehrs werden ebene Straßen immer notwendiger. Unter diesen Umständen ist … ein Instrument erforderlich, das etwaige Fehler graphisch angibt. M. J. Brown hat zu diesem Zweck einen … Viagraph erfunden. Er besteht aus einer Art Schlitten mit engen Kufen, der an einem Strick über die Strasse gezogen wird. Zwischen den Schlittenkufen befindet sich der Registriermechanismus … Das Zahnrad, welches das bewegliche Ende des einarmigen Hebels bildet, ruht auf der Strassenfläche, dreht sich beim Ziehen des Viagraph und wird durch die Feder in alle Unebenheiten der Strasse gedrückt.« *(Umschau, Nr. 2, Jg. 11, S. 35, Januar 1907)*



Das schlittenähnliche Gestell registriert die Unebenheiten der Straße.

Das Papier der Antike

Mit viel Mühe und Geduld entziffern Experten unscheinbare Papyrusfetzen und lesen aus ihnen die Vergangenheit.

Von Joachim Latacz

Ein antiker Text, fast zerfallenen Papyrusblättern mühsam abgerungen, wird neuerdings von den Medien gern als Sensation bejubelt. Dadurch rückt eine bislang weniger beachtete Disziplin der Altertumswissenschaften ins Licht der Öffentlichkeit: die Papyrologie. Ihr Forschungsfeld beschränkt sich auf jene beschrifteten Papyrusblätter (Papyri), die sich als Originale von der Antike bis heute erhalten haben. Keine Spur von goldglänzenden Artefakten. Und doch proklamierten Journalisten in diesem Jahr eine Erschütterung der Grundfesten des christlichen Glaubens, als das »Judas-Evangelium« publiziert wurde. Schon seit den 1970er Jahren befand sich diese Schrift als Teil eines um das Jahr 300 entstandenen Papyrusbuchs in den Händen von Antikenhändlern, doch die hielten es zurück. In der Hoffnung auf das große Geschäft ließen sie den Fund fast verrotten, bis endlich Wissenschaftlern erlaubt wurde, es zu restaurieren und zu edieren (siehe Bild S. 34). Die Kirche selbst lässt dieser Text zwar ungerührt, aber Kirchengeschichtler äußern Freude. Denn es handelt sich um ein Zeitdokument zum Richtungsstreit im frühen Christentum des 2. Jahrhunderts n. Chr. (der jetzt veröffentlichte Text ist die etwa zweihundert Jahre später entstandene Übersetzung einer griechischen Vorlage ins Koptische, das heißt ins christliche Ägyptisch).

Papyrologie – wozu?

Auch der nicht minder in der Presse besungene, 1994 entdeckte Artemidor-Papyrus interessiert vor allem Historiker: Während seine Rückseite Tierzeichnungen aus der Zeit um Christi Geburt zieren, trägt die Vorderseite zum einen eine Passage der im 1. Jahrhundert v. Chr. abgefassten »Erdbeschreibung« eines Artemidoros von Ephesos – mit der wohl ältesten erhaltenen antiken Landkarte überhaupt –, zum anderen um 100 n. Chr. ausgeführte Zeichenübungen von Bildhauerschülern. Die dreifache Nutzung des Blatts vermittelt neue Einsichten in Bereiche unterschiedlicher Zeitstufen; weltbewegend allerdings ist keine davon.

Die Frage ist also: Sind diese antiken Blätter die Aufregung wert? Was können Papyri wirklich leisten? Sicher haben sie wie Antiquitäten immer den Reiz des Authentischen. Doch wie ist es um ihre Aussagekraft bestellt? Wir kennen ja die griechisch-römische Antike, Grundlage unserer heutigen Kultur, bereits recht genau. Das verdanken wir unzähligen Kopisten. Sie haben im Lauf der Jahrhunderte umfangreiche Texte aus der antiken Dichtung, Wissenschaft, Philosophie, Geschichtsschreibung und anderen Bereichen auf immer wieder neuen Papyrus- und seit dem 2. Jahrhundert n. Chr. auch Pergamentblättern in voller Länge abgeschrieben und so bis in die Neuzeit tradiert.

Papyri hingegen sind in der Regel einzelne Blätter, vergleichbar mit herausgerissenen Buchseiten; nur sehr selten haben sich ganze Lagen davon erhalten, wie im Fall des »Judas-Evangeliums«, oder Teile von Rollen, sodass vollständige Werke oder doch wenigstens zusammenhängende Partien vor unseren Augen liegen. Zudem sprechen Papyri selten von Literatur, Religion oder anderen gewichtigen Dingen, etwa 95 Prozent handeln vielmehr vom Alltag. Was also ist von ihnen zu erwarten? Um es vor-

UNIVERSITÄT HEIDELBERG, INSTITUT FÜR PAPYROLOGIE (P. HEID. INV. G 600)

Was in der griechisch-römischen Welt an Schrifttum kursierte, fand sich auch in Ägypten, so wie diese griechische Übersetzung aus dem Alten Testament (7. Jahrhundert n. Chr.).

wegzunehmen: sehr viel, man muss nur die richtigen Fragen stellen.

Das griechische Wort *pápyros* – ins Lateinische übernommen und von dort als *Papier* (deutsch) oder *paper* (englisch) in die modernen Sprachen eingewandert – bezeichnete zugleich eine Pflanze und das aus ihr hergestellte Produkt. Dieses war bis zum Aufkommen des aus Tierhäuten gefertigten Pergaments im 2. Jahrhundert n. Chr. der allgegenwärtige Beschreibstoff in Verwaltung, Recht, Wirtschaft und Kultur der ganzen griechisch-römischen Welt. Auch danach blieb es bis zur Einführung des aus Lumpen hergestellten Hadernpapiers (siehe Bild S. 33) neben dem Pergament in Gebrauch.

Von Ägypten aus hatte sich der Papyrus um 800 v. Chr. international verbreitet, als er zusammen mit der phönizischen Konsonantenschrift zu den Griechen gelangte. Diese schufen durch Einführung von Vokalzeichen eine komplette Lautschrift – das Alphabet, das wir in seiner latinisierten Form nach wie vor benutzen. Mit nur 22 bis 26 Zeichen war es unvergleichlich viel leichter zu erlernen als etwa die vorderorientalische Keilschrift mit ihren rund 600 Zeichen oder die noch wesentlich kompliziertere ägyptische Hieroglyphenschrift.

Erforderte das Lesen und Schreiben im Vorderen Orient und in Ägypten eine jahrelange Schulung, so wurde es jetzt in Griechenland schnell zum allgemeinen Bildungsgut. Eine gebräuchliche Umschreibung für einen Dummkopf lautete nun im Griechischen: »kann weder schwimmen noch lesen und schreiben«.

Geburt der Literatur

Diesem Vorbild folgend übernahmen bald viele Kulturen des Mittelmeerraums das griechische Alphabet, so die Etrusker und Römer. Dadurch wuchs der Bedarf an Papyrus sprunghaft an. Ob öffentliche oder private Sachverhalte, alles ließ sich nun relativ leicht von fachkundigen Schreibern und Notaren schriftlich fixieren. Das wiederum förderte den steten Ausbau gesellschaftlicher Systeme wie der Gerichtsbarkeit, des Verwaltungswesens und des Wirtschaftslebens. Darüber hinaus entstand durch die schriftliche Archivierung ein Wissensspeicher, der Kenntnisse und Erkenntnisse in Erinnerung hielt und dadurch erweiterbar machte. Als Folge davon begann um 600 v. Chr. in der griechischen Stadt Milet an der kleinasiatischen Ägäis-Küste, einem blühenden Hafenort und der ersten Kulturhauptstadt Griechenlands vor Athen, ein Prozess des Ringens um Weltverständnis und Weltbeherrschung, der bis heute anhält: Forschung.

Schon zuvor, im späten 8. Jahrhundert v. Chr., hatte die Kombination aus der so stark vereinfachten Schrift und dem dazugehörigen Beschreibstoff Papyrus die Geburt der europäischen Literatur ermöglicht: Die beiden Großgedichte »Ilias« und »Odyssee« mit ihren etwa 28 000 Versen, die unter dem Namen Homers nunmehr auf Papyrusrollen verbreitet wurden, inspirierten Dichter in ganz Griechenland in den folgenden Jahrhunderten zu eigenen Werken. Allein in Athen wurden im Verlauf des 5. Jahrhunderts v. Chr. im Theater an der ▷

AKG BERLIN (SAMMELBILD VON 1905)

Weil Papyrus nur aus frischen Stängeln hergestellt werden konnte, besaß Ägypten das Monopol für das antike Papier (hier ein Sammelbild von 1905).

▷ Akropolis über tausend Tragödien aufgeführt – jede ein Original. Und das war nur eine Auswahl unter zahlreichen eingereichten Stücken. Hinzu traten andere literarische Gattungen wie Komödie, Lyrik, Geschichtsschreibung, Rhetorik – die literarische Produktion muss also enorm gewesen sein.

Die materielle Basis dieser Entwicklung, die maßgeblich die europäische Kultur hervorbrachte, bildete der Beschreibstoff Papyrus. Hergestellt wurde er aus den langen dreieckigen Stängeln der gleichnamigen Staude. Diese Pflanze mit ihrem charakteristischen Schopf von Blättern wuchs vornehmlich in den Sumpfgebieten entlang dem Nil, insbesondere in seinem Delta. Ihr griechischer Name *pápyros (Cyperus papyrus L.)* wird heute oft von der ägyptischen Bezeichnung *pa-per-aa* abgeleitet, zu Deutsch etwa »Besitz des Pharao«. Das könnte darauf hinweisen, dass der König das Monopol für Verarbeitung und Vertrieb besaß. Die verschiedenen Teile der Staude dienten schon in den Anfängen des Reiches zum Flechten von Seilen, Matten, Körben, aber auch als Leichtbaustoff für Boote.

Das Papier aber fertigte man aus dem weißen Mark. Wie dies vonstatten ging, beschrieb der römische Schriftsteller Plinius der Ältere (1. Jahrhundert n. Chr.) in seiner »Naturgeschichte«. Die Stängel wurden entrindet und in etwa vierzig Zentimeter lange Stücke zerschnitten. Dann trennte man das Mark heraus und teilte es in feine breite Streifen. Diese wurden sodann vertikal aneinandergelegt, darauf kam eine weitere Lage in horizontaler Richtung. Das war die Vorderseite – beim Schreiben über die vertikalen Fasern hinweg störten die Fugen, die Tinte konnte spritzen.

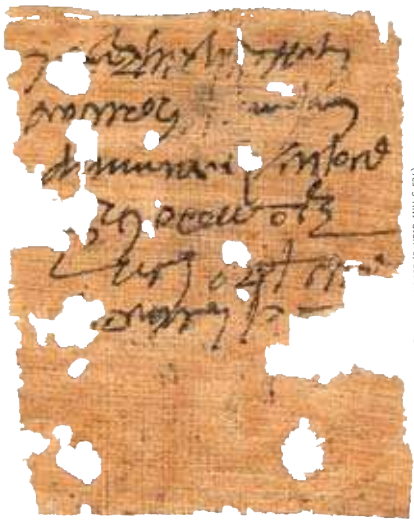
Das rohe »Blatt« wurde mit einem Holzschlägel breitgeschlagen. Dabei trat Pflanzensaft aus, der die Streifen miteinander verklebte; das Ergebnis presste und trocknete man. Nun folgte die Feinarbeit: Glätten der weißen Blätter mit Bimsstein, Beschnitt auf eine Größe zwischen 11 und 24 Zentimeter, Aneinanderlegen der Einzelblätter mit leichter Überlappung, schließlich Verkleben zu einer Papyrusbahn, die zusammengerollt wurde. Ein solches Produkt bestand aus etwa zwanzig Blättern und war zwischen zwei und fünf Meter lang.

Für besondere Zwecke fertigte man Sondermaße – die längste bekannte Rolle erreicht 42 Meter. Erst nachdem im 2. Jahrhundert n. Chr. das Pergament aufkam, wurde die Buchform erfunden; dafür verwendete man Papyrusblätter. Produziert wurde laut Plinius in verschiedenen Güteklassen, von der Tempelqualität *hieratica* bis zum Verbrauchspapier *emporitica*.

Ägyptens Wüstenklima bewahrte die Rollen vor dem Verfall

Damit das Mark vor der Verarbeitung nicht austrocknete, lagen die Werkstätten in der Nähe der Erntegebiete. Deshalb besaß Ägypten zwangsläufig das Produktions- und Verkaufsmonopol und nutzte diesen Wirtschaftsfaktor weidlich aus, wie diverse erhaltene Verträge bezeugen, etwa ein Vertrag über eine Lieferung von 500 Papyrusrollen – also etwa 2,5 Kilometer Papier – nach Byblos in Phönizien. Die Herstellung war aufwändig, der Preis daher hoch. Vermutlich hatte eine Standardrolle den Gegenwert von ein bis zwei Tagen Arbeitslohn eines einfachen Arbeiters. Dementsprechend häufig wurde dieses Produkt wiederverwendet: Man nutzte auch die auf Grund der vertikal laufenden Fasern ungünstigere Rückseite oder schabte auf der Vor-

WILDLIFE (CYPERUS PAPYRUS)



UNIVERSITÄT HEIDELBERG, INSTITUT FÜR PAPYROLOGIE (P. HEID. INV. G 524)

In den sumpfigen Uferregionen und im Delta des Nils wachsen Papyrusstauden. Wie alltäglich ihre Nutzung als Beschreibstoff war, demonstriert diese Zollquittung (rechts). Sie bestätigt, dass 182 oder 214 n. Chr. eine Gebühr für den Transport von Wickensamen aus dem Faijum zum Hafen von Memphis ordnungsgemäß entrichtet worden ist.

derseite die Schrift wieder ab; Papyri der letzten Sorte heißen deshalb in der Fachsprache Palimpseste, »Wiederabgeschabte«.

Zum Schreiben wurde ein Kálamos verwendet, ein Halm der Binse, später des Schilfrohrs. Die Tinte bestand aus Wasser, Gummiarabikum und Ruß. Als »Radierer« diente ein Sandsteinschaber; die von diesem aufgeraute Oberfläche bearbeitete man dann wieder mit einem Glättungssteinchen. Bei Ausgrabungen kamen häufig komplette Schreibsets zu Tage; sie konnten aus schlichtem Holz gefertigt sein, aber auch aus Elfenbein, zuweilen sogar mit Goldbeschlag verziert.

Universell einsetzbar, verbreitete sich der Beschreibstoff Papyrus von Ägypten aus in den gesamten Mittelmeerraum. Doch nur in trockenen, sandigen Gebieten konnte das feuchtigkeitsempfindliche Papier überdauern. Deshalb stammen die meisten uns bekannten Exemplare aus dem südlich von Kairo gelegenen Niltal und den beiderseits des Stroms gelegenen Oasen; hinzu kommen vereinzelte Funde aus Mesopotamien, Nubien, Syrien, Jordanien und Palästina.

Die wenigen Texte, die in Griechenland und Italien zum Vorschein kamen, verdanken wir besonderen Erhaltungsumständen: Der im Jahr 1962 in Derveni bei Thessaloniki gefundene Derveni-Papyrus etwa, der um 340 v. Chr. beschrieben wurde, blieb in einem seit rund 2350 Jahren ungeöffneten Grab konserviert (er ist das älteste Originalschriftstück Europas auf Papier). In Italien bewahrte die Asche des 79 n. Chr. ausgebrochenen Vesuvs Teile einer Bibliothek in Herculaneum (Villa dei Papiri) vor dem Zerfall. Die weit überwiegende Anzahl von Papyri – nicht nur ägyptisch beschriftet, sondern auch persisch, aramäisch, lateinisch, arabisch und vor allem eben griechisch – stammt jedoch aus Ägypten.

Es wäre wunderbar, könnten all diese Quellen von einer einzigen Fachdisziplin bearbeitet werden, doch dafür fehlt die Vielsprachenkompetenz. So wandern die ägyptischen Papyri zu den Ägyptologen, die persischen in die Iranistik, die aramäischen in die Theologie und so fort. Weil aber die meisten Texte in griechischer Sprache verfasst sind und die systematische Papyruskunde mit diesen ihren Anfang nahm, versteht man heute unter Papyrologie vor allem die Wissenschaft von diesen griechischen Papyri; die relativ wenigen lateinisch beschriebenen nimmt man großzügig hinzu.

Daraus ergibt sich auch eine klare zeitliche Eingrenzung des Arbeitsfelds: Ägypten geriet im Jahr 332 v. Chr. durch den Eroberungsfeldzug Alexanders des Großen unter die Herrschaft des makedonisch-griechischen Herrschergeschlechts der Ptolemäer, verblieb dort rund 300 Jahre lang bis zum Selbstmord Kleopatras 30 v. Chr. und wurde danach römische Provinz. Diese Phase wiederum endete mit der Invasion der Araber 641 n. Chr. Amtssprache war im Land der Pharaonen während der fast tausend Jahre währenden griechisch-römischen Herrschaftszeit vor allem das Griechische. Ergo: Alles, was in dieser Zeit in Ägypten in Griechisch oder Lateinisch auf Papyrus geschrieben wurde oder in diesen Sprachen aus anderen Ländern dorthin gelangte, bildet das Arbeitsgebiet der Papyrologen. Den größten Anteil daran haben – abgesehen von Privatkorrespondenz, Schülerarbeiten oder Ähnlichem – Urkunden und alle Arten von Dokumenten in Verwaltung, Recht, Wirtschaft, Politik und Religion. Viele stammen aus Ruinen und Gräbern. Dank neuer Verfahren wie der MSI (Multi-Spectral-Imaging-Technik), die Fragmente bei verschiedenen Wellenlängen abscannt, lassen sich inzwischen auch seinerzeit für Mumienkartonagen zweckentfremdete Schriftstücke oft lesbar machen. ▷

▷ Die ergiebigste Quelle waren und sind aber die Abfallhaufen antiker Siedlungen. Dies erkannten zunächst ägyptische Bauern Ende des 18. Jahrhunderts. Die oft zwanzig Meter hohen Abfallhaufen lieferten ihnen guten Dünger; als sie das Interesse europäischer Bildungsreisender an den beschrifteten Abfallpapieren gewahrten, boten die Haufen zudem einen lukrativen Nebenverdienst. Die nächste Phase setzte mit Napoleons Ägypten-Expedition von 1798 ein. Diese löste in Europa ein Faible für das Land der Pyramiden und Tempel aus. In ihrem Gefolge kamen nun häufig betuchte Antiquitätenjäger ins Land, die für die »Fetzen« gutes Geld boten. Bald gingen reiche Europäer selbst auf Papyrussuche, und sogar professionelle Unternehmen bedienten die europäischen Sammler.

Eines der erfolgreichsten war der Londoner Egypt Exploration Fund (heute Egypt Exploration Society), der seit 1895 Ausgrabungen in dem vom Empire verwalteten Ägypten organisierte. Die Altertumswissenschaftler Bernard Grenfell und Arthur Hunt vom Queen's College Oxford waren im Auftrag dieser Gesellschaft unterwegs, als sie 1897 im antiken Oxyrhynchos, rund 160 Kilometer südwestlich von Kairo, fündig wurden.

Die griechische Beamtenoberschicht der einst drittgrößten Stadt des griechischen Ägypten war offensichtlich sehr bildungsbeflissen gewesen, denn die Ausgräber entdeckten im Müll einer emsigen Bürokratie auch zahlreiche Überbleibsel von Kopien anspruchsvoller griechischer Literatur. Vieles davon war durch abschriftliche Überlieferung bereits bekannt, manches aber auch neu – etwa Texte der frühen griechischen Lyrik, unter anderem ein stark fragmentiertes Gedicht der im späten 7. Jahrhundert v. Chr. geborenen Dichterin Sappho sowie christliche Schriften, darunter auch ein »Thomas-Evangelium«. Intensivere Grabungen zwischen 1903 und 1906 brachten erneut enorme Mengen Papyri zum Vorschein. So wurde die Oxforder Sammlung zur größten der Welt und umfasst nach Angaben der Direktion heute etwa 400 000 Fragmente.

Seit 1897 arbeiten Wissenschaftler daran, diesen Schatz zu entziffern. In 69 Bänden der Reihe »The Oxyrhynchus Papyri« wurden bislang aber nur zirka 5000 Objekte publiziert: etwas mehr als ein Prozent des Bestands. Viele Kisten lagern außerhalb der Universitätsstadt. Das ist zwar nicht die Regel, aber auch Bestände anderer Papyrussammlungen wie der Museen in Wien, Berlin, Florenz, der Universitäten in Mailand, Heidelberg, Köln, Trier, Berkeley, Yale oder Ann Arbor sind noch längst nicht ausgewertet, oft noch nicht einmal gelesen. Nach mehr als hundert Jahren!

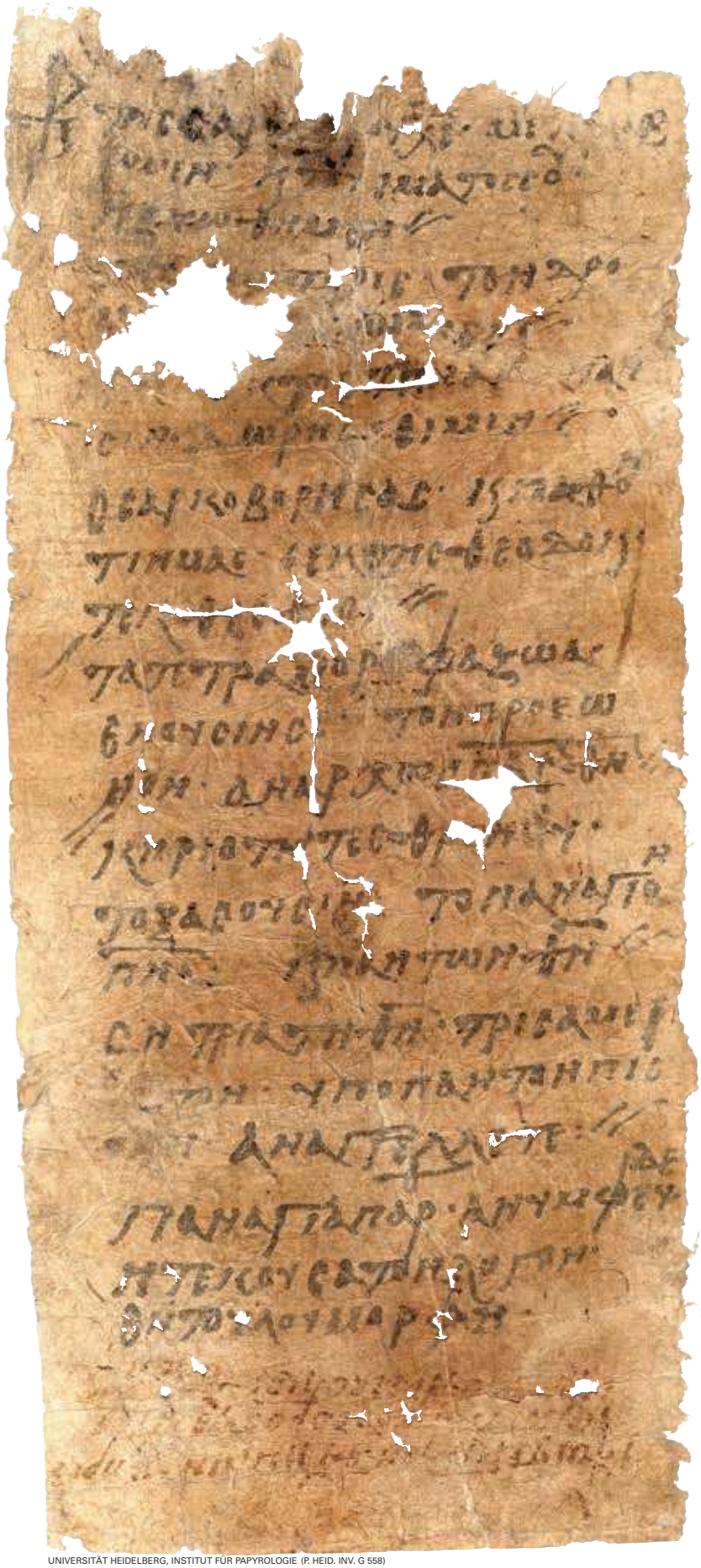
Wurmzerfressene Blätter

Doch das muss man verstehen, denn die Papyrologie ist eine äußerst zeitaufwändige Wissenschaft. Das liegt am Zustand ihres Materials, den Hans-Albert Rupprecht von der Universität Marburg 1994 so beschrieb: »Lose Blätter, zerrissen und zerknittert, von Würmern zerfressen, zu Rollen gewickelt, gefaltet und dann gepresst, harte Knäuel mit Erde bedeckt, steinhart oder auch lose und sehr zerbrechlich, in größeren oder kleineren Fragmenten.« Nicht allein das Entsorgen des Abfallpapiers auf der Mülldeponie ist

Zur Ausrüstung der Schreiber gehörten Halme, Tinte samt Behälter, eine Tafel als Unterlage, Papiermesser – und Papyrus (die Rekonstruktion zeigt ein Blatt mit hieratischer Schrift).

BPK BERLIN / RMN (LOUVRE, PARIS)

Nach der arabischen Eroberung kamen in Ägypten auch Hadernpapiere in Gebrauch, die aus textilen Resten hergestellt wurden (hier ein christlicher Abendhymnus aus dem 9./10. Jahrhundert). Die Fasern verlaufen hier nicht streng über Kreuz, deshalb waren Vorder- und Rückseite beschreibbar.



UNIVERSITÄT HEIDELBERG, INSTITUT FÜR PAPYROLOGIE (P. HEID. INV. G 558)

dafür verantwortlich, sondern auch der oft zweckentfremdende Gebrauch zuvor (so klagte etwa ein römischer Dichter darüber, dass seine Werke im Kaufladen als Papiertüten verwendet würden).

Die erste Aufgabe des Papyrologen lautet deshalb Reinigung. Ein mühsames Geschäft: Schmutz entfernen, Knäuel auflösen, Lagen trennen, Blätter glätten und, was dabei herauskommt, konservieren, damit es nicht zerfällt. Erst danach folgt das Lesen. Doch in welcher Sprache hat sich der Verfasser in seiner oft sehr individuellen Handschrift überhaupt geäußert? Worum geht es in dem meist ja nur sehr bruchstückhaften Text, ist er als »dokumentarisch« oder »literarisch« zu klassifizieren? Die eigentliche Herausforderung wartet dann im dritten Schritt: die Divination (nach dem lateinischen *divinatio*, »das Vermögen, Dinge vorauszusehen, zu erahnen und zu erraten, die eigentlich nur die Götter wissen können«). Dagegen wirken die heute so beliebten Sudoku-Rätsel wie Kinderspiele. Die Kunst besteht darin, die vielen Lücken in den Texten so weit wie möglich zu schließen. Dazu bedarf es überdurchschnittlicher Kenntnisse der Sprache, der je nach Textgattung und Thema gebräuchlichen Redewendungen und Fachbegriffe, der antiken Kultur- und Literaturgeschichte sowie vieler weiterer Faktoren.

Erst wenn all das zusammenkommt, vermag ein Forscher aus dem oft höchst jämmerlichen Rest, der vor ihm liegt, den ursprünglichen Zusammenhang und den vermutlich gemeinten Sinn zu erschließen. Wenn das geleistet ist, kann er als Krönung der Arbeit versuchen, Lücken durch Buchstaben oder gar ganze Wörter zu schließen. Gelingt dann bei literarischen Papyri noch die Zuordnung des so ergänzten Textes zu einem Autor oder gar die Gewissheit, dass ein bis dahin noch gänzlich unbekannter Text vorliegt, ist ein Meisterstück geglückt.

Es folgt die Edition mit Beschreibung und Fotografie des Originals, Datierungsvorschlag, Umschrift in Druckbuchsta- ▷

ben, Größenangabe der Lücken, Vorschlägen zu ihrer Ergänzung und schließlich mit einem Kommentar. Das alles braucht natürlich Zeit; der langsame Abbau der weltweiten Papyribestände beruht also keineswegs auf Saumseligkeit. Damit zurück zur Ausgangsfrage: Lohnt der Ertrag die Mühe?

Ein Esel für fünf Talente

Als Zweig der Altertumswissenschaft hat auch die Papyrologie die Aufgabe, die Entwicklung der menschlichen Kultur zu rekonstruieren und bewusst zu halten. In diesem Rahmen fällt ihr eine sogar sehr wichtige Funktion zu: Sie füllt Wissenslücken im Detailbereich. Dazu zwei Beispiele aus Oxyrhynchus. Auf den 12. Februar 307 (nach unserer Zeitrechnung) ist ein Kaufvertrag datiert, in dem ein Aurelios Ophelios, Sohn des Paulos und der Tísaïs aus dem Dorf Isieion Kato im Bezirk von Oxyrhynchos, bestätigt, einem Aurelios Theodoros aus Oxyrhynchos einen jungen männlichen Esel zum Preis von fünf Talenten und tausend Drachmen verkauft und dieses Geld vollständig erhalten zu haben. Vom 15. August 127 stammt ein Pachtvertrag, in dem Eudaimon, Eudaimons Sohn, aus der Stadt Oxyrhynchos, einem Dionysios, Sohn des Dionysios, aus Lenon bei Pela, beim Ort Paeimis ein im Vertrag genau bezeichnetes Stück Ackerland für sechs Jahre überlässt. Das Dokument benennt den jährlichen Pachtzins, zahlbar im Monat Payni auf dem Dreschplatz von Lenon in Form von frischem, reinem Weizen, frei von Gerste und gesiebt.

Dokumente dieser Art werden uns nur durch Papyri zugänglich, das von Kopisten überlieferte Schrifttum enthält sie nicht. Dem Laien mag dergleichen banal vorkommen, und für sich genommen trifft das jeweils auch zu. Doch jedes derartige Dokument ist ein Puzzlestein, der uns hilft, Bereiche der antiken Gesellschaft zu verstehen. Wie war der Verwaltungsapparat aufgebaut? Wie funktionierten Gerichtsbarkeit, Finanz- und Bankenwesen? Wie waren die geläufigen Finanzinstrumente – etwa Kauf, Darlehen, Miete, Bürgschaft – geregelt? Aber auch schon die schlichte Demografie antiker Gesellschaften hält heute noch mehr Fragen als Antworten parat – zu Bevölkerungszahlen, Lebenserwartung, Ehevertragsrecht und vielen anderen Komponenten. Indem die Papyri gesammelt, nach Typen klassifiziert, Landregionen, Zeiträumen und anderen Bereichen zugeordnet werden, entsteht ein Bild sozialer Teilsysteme, deren Zusammenführung den Entwicklungsstand der Zivilisation zumindest in einem Teil der Alten Welt, im hellenistisch-römischen Ägypten, außerordentlich detailreich fassbar macht und Schlüsse auf die Höhe der damaligen Gesamtkultur ermöglicht. Auch wenn der Kauf eines Esels oder das Verpachten eines Stücks Ackerland für sich genommen unspektakulär erscheint, helfen solche Informationen, das Alltagsleben der Menschen durch die letzten fast tausend Jahre des griechisch-römischen Altertums lebendig werden zu lassen.

Kulturhöhe bemisst sich aber nicht nur nach dem Organisationsgrad einer Gesellschaft, sondern auch nach der Qualitätsstufe ihrer künstlerischen und wissenschaftlichen Produkte. Gerade in jüngerer Zeit erleben antike Werke eine Renaissance in Literatur und Theater.

FOTO: KENNETH GARRETT, NATIONAL GEOGRAPHIC SOCIETY, AUS: HERBERT KROSNEY, DAS VERSCHOLLENE EVANGELIUM, WHITE-STAR-VERLAG 2006 – MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG VON WHITE STAR

Papyrologie ist Teamwork. Am »Judas-Evangelium« arbeiteten Experten für koptische Sprache und für C-14-Datierung sowie eine Restauratorin, bevor Bibelforscher ans Werk gingen.

Die Klage der Sappho

Ihr nun eilt zu der Musen, der veilchenbusigen, schönen Geschenken, ihr Mädchen, eifrig hin – und hin zu der liederverliebten hell klingenden Lyra:

Mir aber hat den früher einmal so zarten Körper das Alter inzwischen ganz gepackt schon; weiß sind die Haare geworden, die schwarzen;

schwer ist mir die Seele geworden; nicht tragen die Knie mehr, sie, die doch einstmals flink waren zum Tanzen gleich Rehen.

Darüber seufze ich oft jetzt. Doch was soll ich machen?

Alterslos zu werden als Mensch, der man ist, das ist ja nicht möglich.

Hat doch einst den Tithonos, so sagt man, die rosenarmige Eos, von der Liebe ergriffen, fort bis an die Enden der Erde getragen,

als er schön war und jung. Doch es packte ihn trotzdem mit der Zeit das weißliche Alter – und hatte zur Frau eine Göttin unsterblich!

Dieses Lied der im 7. Jahrhundert v. Chr. geborenen griechischen Dichterin Sappho gehört zum Typus der Altersklage; die frühgriechische Dichtung ist voll von Beispielen dieser Art. Die körperlichen Symptome des Alterns werden aufgezählt, die seelische Beschwernis beim Rückblick auf die eigne und beim Hinblick auf die fremde Jugend ausgedrückt, das deprimierende Wissen um die Unausweichlichkeit des Alterungsprozesses beklagt. Als Bild dient der Mythos vom jungen schönen Tithonos, in den sich Eos, die Göttin der Morgenröte, verliebte. Sie erlangte für ihn Unsterblichkeit von Zeus, vergaß aber, auch Alterslosigkeit zu erbitten, sodass der Geliebte neben der stets jugendfrischen Göttin auf ewig als Greis dahinvegetieren musste.

Leider können sich Intendanten und Stückeschreiber nur auf Restbestände der einstigen Produktion stützen. Von Sapphos Œuvre etwa blieben schätzungsweise nur sieben Prozent erhalten (das meiste übrigens gerade durch Papyri). Etwas besser bestellt ist es um die Werke der drei großen attischen Tragiker Aischylos, Sophokles und Euripides. Den antiken Berichten zufolge schrieben sie rund 300 Stücke, davon sind immerhin 31 erhalten, also etwa zehn Prozent. Viele andere in ihrer Zeit hochgerühmte griechische Literaten kannten wir lange Zeit sogar nur aus späteren antiken Erwähnungen und gelegentlichen Zitaten aus ihren Werken. Zu ihnen gehörte der Athener Menander (342–290 v. Chr.). Von seinen über hundert Komödien waren bis 1897 nur wenige Verse bekannt.

Sapphos Verse in Köln

Dann aber kamen Papyri mit Menander-Texten zum Vorschein – zunächst nur kürzere Textpartien aus verschiedenen Stücken, 1958 aber in der Genfer Privatsammlung Bodmer sogar ein ansehnlicher Teil einer Papyrusrolle mit dem vollständigen »Dyskolos« (zu Deutsch Griesgram, Menschenfeind). Zehn Jahre später kamen aus der gleichen Rolle noch größere Teile zweier weiterer Komödien hinzu. Nun wurden die begeisterten Urteile besonders der römischen Menander-Nachdichter Plautus und Terenz verständlich, und die Entwicklungsgeschichte der griechisch-römischen Komödie lässt sich dank diesem Papyrusfund heute auf einer viel solideren Grundlage darstellen.

Mitunter verdanken wir es Papyri, dass namentlich bekannte antike Künstler überhaupt fassbar wurden. Dazu gehört zum Beispiel Bakchylides, der größte Konkurrent des im 5. Jahrhundert v. Chr. wirkenden griechischen Dichterfürsten Pindar. Ein anderes Beispiel ist der im 3. Jahrhundert v. Chr. im griechischen Alexandria im Nildelta wirkende Dichtergelehrte Kallimachos: In Rom berief sich im 1. Jahrhundert v. Chr. eine ganze Schule von lateinisch dichtenden Avantgardisten auf ihn als ihren Wegbereiter. Doch erst zu Beginn des 20. Jahrhunderts machten Papyrusfunde aus diesem Schatten für uns eine greifbare Persönlichkeit von genialer Neuerungskraft. Aber auch für immer verloren geglaubte Prosawerke sind uns durch Papyri wiedergeschenkt worden, wie die »Staatsverfassung der Athener«, ein politikwissenschaftliches Werk des Aristoteles, das im Jahr 1891 zum Vorschein kam.

Die Aufzählung weiterer bedeutender Funde würde Seiten füllen. Begnügen wir uns hier mit einer Entdeckung aus jüngster Zeit, einem Lied Sapphos. Bisher waren davon nur ein paar Vers-Enden bekannt. Vor zwei Jahren dann wurden aus der Kölner Papyrussammlung zwölf nahezu vollständige Verse publiziert. Sie zeigen Sappho, die scheinbar ewig jugendliche Dichterin der Schönheit und der Liebe, im Ringen mit dem Alter – und rücken sie uns menschlich wieder ein Stück näher (siehe Liedtext oben).

So fällt denn das abschließende Urteil mehr als positiv aus. Auch wenn viele Entdeckungen keineswegs so sensationell sind, wie es Medienberichte mitunter darstellen, oft nur Puzzlesteine im großen Gesamtbild der Antike – das bewundernswert zähe Engagement der Papyrologen lohnt sich. Sie bereichern die Kultur- und Literaturwissenschaften, und sie inspirieren auch die moderne Literatur durch ihre Entdeckungen immer wieder aufs Neue. Kaum ein Zweig der Altertumswissenschaften bietet jungen Forschern heute noch derart vielfältige Möglichkeiten wie die Papyrologie. ◁

Joachim Latacz ist emeritierter Ordinarius für Griechische Philologie an der Universität Basel.

Kleine Einführung in die Papyruskunde. Von Hans-Albert Rupprecht. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt 1998

Die griechische Literatur in Text und Darstellung. Archaische Periode. Von Joachim Latacz. Reclam Stuttgart, 2. Auflage 1998

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de/artikel/853649.

AUTOR UND LITERATUR

Diesen Artikel können sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Wie Genies denken

Untersuchungen mentaler Prozesse bei Schachmeistern zeigen: Für Staunen erregende geistige Leistungen – gleich auf welchem Gebiet – braucht es keine Ausnahmebegabung, sondern nur stetigen Drill.

Von Philip E. Ross

Ein Mann geht an einer Reihe von Schachtischen entlang, die kreisförmig um ihn aufgestellt sind. An jedem lässt er zwei bis drei Sekunden lang seinen Blick über eine Partie schweifen und zieht eine Figur. Auf der Außenseite des Kreises sitzen Dutzende von Amateuren, die über den nächsten Zug nachdenken, bis ihr Gegner nach vollendeter Runde wieder bei ihnen angelangt ist. Wir schreiben das Jahr 1909. Der Mann ist José Raúl Capablanca aus Kuba und sein Triumph ist total: Er gewinnt alle 28 Partien. Das Simultan-Turnier absolvierte er im Rahmen einer Tour, auf der er 168 Siege in Folge errang.

Wie schaffte es der Kubaner, in diesem Tempo so gut zu spielen? Und wie tief konnte er in der kurzen Zeit die Partie analysieren? »Ich sehe nur einen Zug im Voraus«, soll Capablanca gesagt haben, »aber der ist immer der richtige.«

Mit diesem Bonmot brachte er auf den Punkt, was psychologische Untersuchungen in den hundert Jahren seither ergaben: Die Überlegenheit eines Schachmeisters gegenüber Anfängern zeigt sich vor allem in den ersten Denksekunden.

Auch Experten auf anderen Gebieten brillieren mit solch einem schnellen fachbezogenen Auffassungsvermögen, für das Leibniz einst den Begriff Apperzeption prägte. Ebenso wie sich ein Schachmeister alle Züge einer Partie, die er gerade gespielt hat, merken kann, vermag ein versierter Musiker die Partitur einer nur einmal gehörten Sonate niederzuschreiben. Und wie der Schachmeister den besten Zug im Handumdrehen findet, kann ein erfahrener Arzt in einer nur wenige Augenblicke dauernden Untersuchung eine akkurate Diagnose stellen.

Wie erlangen Experten dieser ganz unterschiedlichen Disziplinen ihre frappierenden Fähigkeiten? Wie viel ihres Könnens beruht auf angeborener Begabung und was geht auf das Konto intensiven Trainings? Psychologen haben bei Schachmeistern nach Antworten auf diese Fragen gesucht. Was sie im Lauf eines Jahrhunderts an Erkenntnissen zusammentrugen, liefert neue Einsichten in die Art und Weise, wie das Gehirn Informationen aufbereitet, speichert und wieder abruft. Zugleich könnte es große Bedeutung für Lehrer haben. Vielleicht helfen dieselben Techniken, mit denen Schachmeister ihre Sinne schärfen, bei der Unterweisung von Schülern in Lesen, Schreiben und Rechnen.

Die Drosophila der Kognitionswissenschaft

Die Geschichte menschlichen Expertentums beginnt mit der Jagd. Sie meisterlich zu beherrschen war für unsere frühen Vorfahren überlebenswichtig. Der erfahrene Jäger weiß nicht nur, wo der Löwe gewesen ist, er kann auch schließen, wo er hingehen wird. Die Fähigkeit zum Spurenlesen verbessert sich, wie mehrere Studien zeigen, »von der Kindheit an linear bis zu einem Alter um Mitte dreißig, wo sie ihren Höhepunkt erreicht«, sagt John Bock, Anthropologe an der California State University in Fullerton. Einen Hirnchirurgen auszubilden geht schneller.

Wahre Experten müssen ihre haushohe Überlegenheit gegenüber Anfängern unter Beweis stellen können, sonst sind sie nur Stümper mit Diplom. Leider gilt das für allzu viele angebliche Spezialisten. So haben strenge Tests in den letzten zwei Jahrzehnten gezeigt, dass professionelle Anleger nicht erfolgreicher investieren als Amateure, renommierte Weinkenner bei der Beurteilung eines guten Tropfens nicht viel besser abschneiden als Banausen und hoch angesehene Psychiater ihren Patienten kaum wirksamer helfen als weniger berühmte Kollegen. Und selbst wo zweifelsfrei eine hohe Kompetenz vorhanden ist – wie etwa bei guten Lehrern oder erfolgreichen Geschäftsführern –, lässt sie sich oft nur schwer messen, geschweige denn erklären.

Für meisterliche Fähigkeiten im Schach gilt das nicht. Sie lassen sich in ihre Komponenten zerlegen, in Laborexperimenten überprüfen und in ihrer natürlichen Umgebung, bei Schachturnieren, leicht beobachten. Aus diesen Gründen dient das königliche Spiel als wichtigster Prüfstein für Theorien über das Denken – gewissermaßen als die *Drosophila* der Kognitionswissenschaft.

Fähigkeiten im Schach wurden gründlicher gemessen als bei allen anderen Spielen, Sportarten oder was immer für Tätigkeiten, die mit Wettbewerb einhergehen. Statistische Formeln erlauben es, die jüngsten Leistungen von Schachspielern mit früheren zu vergleichen und Erfolge anhand der Stärke des Gegners zu bewerten. Daraus ergibt sich eine Einstufung (ein Rating) in Form einer nach ihrem Erfinder Arpad E. Elo benannten Maßzahl, mit der sich der Ausgang weiterer Partien erstaunlich genau vorhersagen lässt. Wenn Spielerin A eine ▷

ETHAN HILL

Angestrengtes Üben ist der Schlüssel zum Erfolg – im Schach, in der klassischen Musik, im Sport und auf vielen anderen Gebieten. Nach neuen Forschungsergebnissen spielt Motivation eine wichtigere Rolle als angeborene Fähigkeiten.

▷ Elo-Zahl hat, die 200 Punkte über der von Spieler B liegt, wird sie im Schnitt 75 Prozent der Begegnungen mit B gewinnen.

Das gilt für Topspieler wie Anfänger. Der russische Exweltmeister Garry Kasparow mit einer Elo-Zahl von 2830 gewinnt im Schnitt drei von vier Partien gegen den an hundertster Stelle gelisteten Großmeister Jan Timman aus den Niederlanden, der es nur auf 2616 Punkte bringt. Ebenso wird ein durchschnittlicher Hobbyspieler mit einer Elo-Zahl um 1200 drei Viertel der Partien gegen einen gehobenen Anfänger mit nur 1000 Punkten für sich entscheiden.

Auf diese Weise können Psychologen die Fähigkeiten eines Schachmeisters anhand seiner Leistungen quantitativ bewerten, statt sie aus seinem fragwürdigen Renommee abzuleiten. Außerdem lassen sich Veränderungen der Spielstärke im Lauf einer Karriere verfolgen.

Ein letzter Grund, warum Kognitionswissenschaftler Schach als Modell gewählt haben und nicht etwa Billard oder Skat, ist sein Ruf als »Probierstein des Gehirns«, wie es Goethe im »Götz von Berlichingen« ausdrückt. Die Großtaten der Schachmeister gelten schon seit Langem als Ausdruck ihrer fast übermenschlichen Geisteskräfte.

Diese mentalen Fähigkeiten zeigen sich am klarsten in so genannten Blindpartien, in denen beide Spieler das Schachbrett nicht sehen dürfen. Im Jahr 1894 ließ sich der französische Psychologe Alfred Binet – Miterfinder des ersten Intelligenztests – von einigen Schachmeistern beschreiben, was dabei vor ihrem geistigen Auge abläuft. Er vermutete zunächst, dass die Blindspieler eine Art fotografisches Bild des Bretts im Kopf haben, wurde aber bald eines Besseren belehrt: Die »Visualisierung« läuft sehr viel abstrakter ab. Die Großmeister sahen mit ihrem inneren Auge keineswegs ein Foto der Stellung mit allen realistischen Details wie der Krone des Königs oder der Maserung des Holzes, sondern merkten sich nur allgemeine Dinge wie die Position einer Figur relativ zu den anderen. Die gleiche Art von implizitem Wissen hat etwa ein Pendler von den Haltestellen seiner U-Bahn-Linie.

Geflecht aus strukturiertem Wissen

Ein blind spielender Großmeister nutzt dabei auch Erinnerungen an Schlüsselpositionen aus früheren Partien. Nehmen wir einmal an, ihm ist die genaue Position eines Bauern entfallen. Er kann sie sich aber wieder ins Gedächtnis rufen, indem er zum Beispiel Standarderöffnungen im Kopf durchspielt, die sehr gut analysiert sind und nur wenige Optionen offen lassen. Oder er erinnert sich vielleicht an den Verlauf der Partie und überlegt: »Ich konnte den Turm zwei Züge zuvor nicht schlagen. Der Bauer muss daher im Weg gestanden haben …« Es ist nicht nötig, dass ein Spieler alle Details ständig abrufbar im Kopf hat, da er jede Einzelheit bei Bedarf rekonstruieren kann, indem er auf ein wohlorganisiertes System von Querbezügen zurückgreift.

Mit einem solchen komplexen Gewebe aus strukturiertem Wissen lässt sich also erklären, wieso Schachmeister in Blindpartien erfolgreich sind. Würden auch ihre anderen Fähigkeiten – etwa das Vorausberechnen von Zügen oder das Ersinnen raffinierter Strategien – auf diesem mentalen Informationsnetz beruhen, hinge überragendes Können im Schach weniger von angeborenen Fähigkeiten als von gezieltem Training ab.

Der Psychologe Adriaan de Groot, selbst Schachmeister, fand dies schon 1938 bei einem großen internationalen Turnier in den Niederlanden bestätigt. Er verglich dabei durchschnittliche und starke Spieler mit den damals führenden Schachgroßmeistern. Dazu fragte er sie unter anderem nach ihren Überlegungen beim Auswerten einer Position aus einem der Turnierspiele.

Wie de Groot damals feststellte, untersuchten starke Spieler deutlich mehr Zugvarianten als schwache. Bei den Schachmeistern und -großmeistern stieg die Zahl der analysierten Züge dagegen nicht viel weiter an. Statt mehr Möglichkeiten zu durchdenken, beschränkten sich die besseren Spieler auf die aussichtsreicheren Varianten – wie schon Capablanca behauptet hatte – und verfolgten sie gründlicher.

Jüngste Forschungsergebnisse zeigen allerdings, dass de Groots Ergebnisse nur für die Art der von ihm gewählten Stellungen gelten. Wenn es auf intensive, präzise Überlegungen ankommt, können Großmeister ihre Erfahrung ausspielen und den sich verzweigenden Baum erlaubter Zugfolgen tiefer absuchen als irgendein Amateur. Analog überblicken erfahrene Physiker zuweilen mehr Möglichkeiten als Physikstudenten.

In beiden Fällen jedoch stützt sich der Experte weniger auf ein größeres angeborenes Talent zum analytischen Denken als auf seinen Datenspeicher aus strukturiertem Wissen. Mit einer komplizierten Stellung konfrontiert, mag ein schwächerer Spieler eine halbe Stunde über dem Brett brüten und viele Züge vorausberechnen, auf den richtigen aber trotzdem nicht kommen. Ein Großmeister hingegen sieht diesen Zug sofort, ohne überhaupt bewusst irgendetwas zu analysieren.

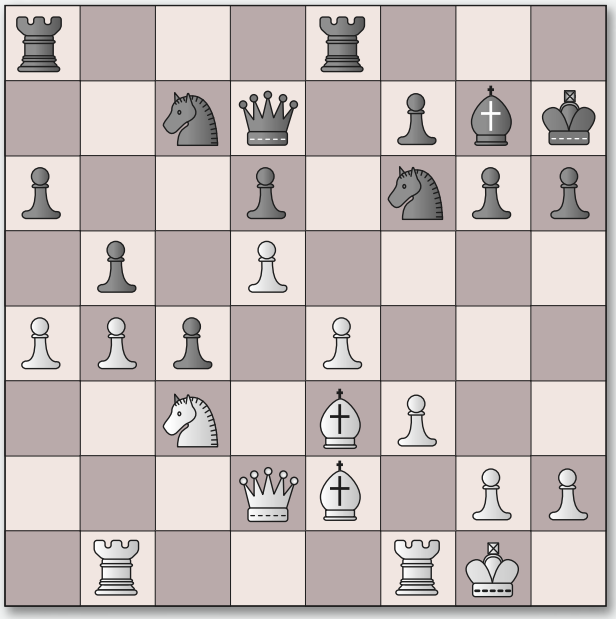
De Groot hatte seinerzeit noch einen anderen Versuch gemacht. Dabei ließ er seine Testpersonen eine Stellung für kurze Zeit betrachten und bat sie dann, diese aus dem Gedächtnis zu reproduzieren. Anfänger konnten nur wenige Figuren richtig anordnen, auch wenn sie dreißig Sekunden Zeit gehabt hatten, sich die Positionen einzuprägen. Großmeister dagegen hatten eine Stellung nach nur we-

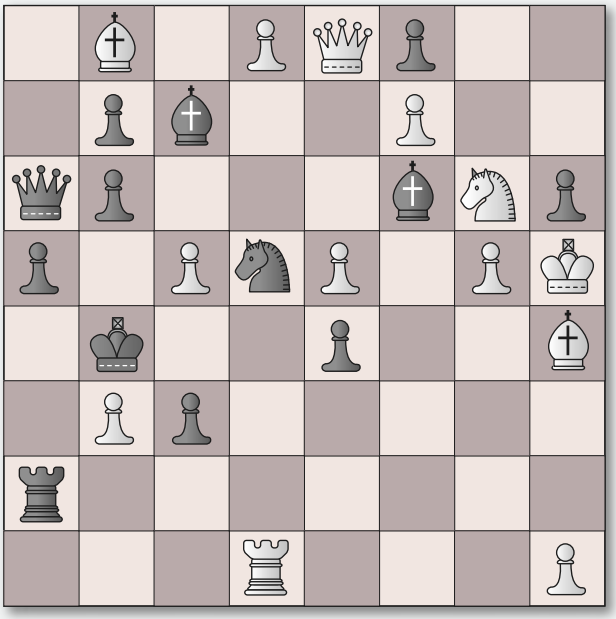
In Kürze

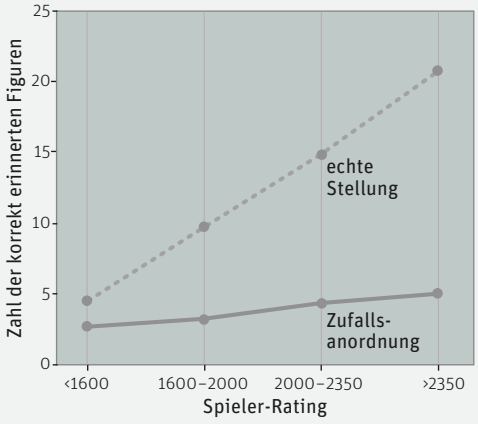
- Da sich Fähigkeiten im Schach leicht messen und in Laborversuchen analysieren lassen, ist das Spiel zu einem wichtigen **Prüfstein für Theorien der Kognitionswissenschaftler** avanciert.
- Untersuchungen zufolge zeichnen sich Schachgroßmeister durch einen riesigen Wissensschatz über Spielstellungen aus. Nach Ansicht einiger Forscher fassen sie diese Information zu »Brocken« zusammen, die leicht im **Langzeitgedächtnis** auffindbar sind und für **Denkprozesse** ins Arbeitsgedächtnis geholt werden können.
- Um dieses **strukturierte Wissen** zu erwerben, müssen Großmeister typischerweise viele Jahre lang intensive Schachstudien betreiben und sich dabei jeweils Aufgaben stellen, die sie knapp überfordern. Spitzenkönner in Musik, Mathematik und Sport erlangen ihre Fähigkeiten offenbar auf dieselbe Weise. Dabei sorgen **Wettbewerbe und Erfolgserlebnisse** für die nötige Motivation.

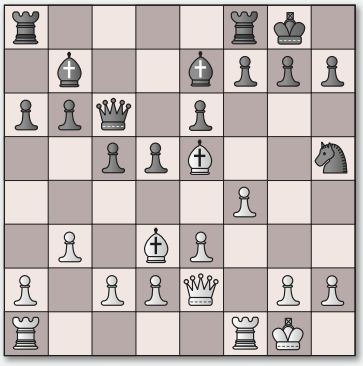
Das Gedächtnis eines Grossmeisters

Experimente lassen darauf schliessen, dass das Gedächtnis von Schachmeistern auf typische Spielstellungen zugeschnitten ist. In dreizehn Untersuchungen zwischen 1973 und 1996, die in einem Übersichtsartikel von 1996 referiert sind, durften Spieler unterschiedlicher Stärke maximal zehn Sekunden lang Schachstellungen betrachten, die aus tatsächlichen Partien stammten (links) oder nach dem Zufallsprinzip erzeugt waren (rechts). Anschließend sollten sie die Positionen der Figuren aus dem Gedächtnis rekonstruieren. Die Ergebnisse (Diagramm links unten) zeigten, dass sich Schachmeister (mit einer Elo-Zahl über 2200) und Schachgroßmeister (ab 2400) zwar an Stellungen aus tatsächlichen Spielen deutlich präziser erinnern konnten als schwächere Spieler, bei den Zufallsstellungen aber kaum besser abschnitten. Ein solches auf Schach geprägtes Langzeitgedächtnis scheint also entscheidend für eine hohe Spielstärke zu sein.









Das Grossmeistern eigene strukturierte Wissen über Schachstellungen versetzt sie in die Lage, sehr schnell den besten Zug zu finden. Das Beispiel links stammt aus einem berühmten, 1889 ausgetragenen Spiel zwischen Emanuel Lasker (weiß) und Johann Bauer (schwarz). Während Anfänger die Stellung ausgiebig analysieren müssen, um den Gewinnzug für Weiß zu finden, erkennt ihn jeder Schachmeister sofort. Die Auflösung steht auf S. 43.

LUCY READING-IKKANDA, NACH: FERNAND GOBET ET AL., CHUNKING MECHANISMS IN HUMAN LEARNING, TRENDS IN COGNITIVE SCIENCES, BD. 5, NR. 6, JUNI 2001

nigen Sekunden im Kopf und reproduzierten sie fehlerlos. Das konnte nicht an ihrer besonderen Merkfähigkeit liegen; denn bei gewöhnlichen Erinnerungstests schnitten sie nicht besser ab als andere. Der Unterschied bezog sich nur auf Schach. Demnach musste er das Resultat von Erfahrung und Training sein.

Zu ähnlichen Ergebnissen kamen Forscher auch auf anderen Gebieten. So können sich Bridgespieler besonders gut an üblicherweise gespielte Karten erinnern, Programmierer riesige Mengen von Computer-Code rekonstruieren und Musiker lange Notenfolgen im Gedächtnis behalten. Solch ein spezifisches Erinnerungsvermögen im jeweiligen Fach ist ein Standardkriterium für Expertentum.

Dass Schachmeister sich mehr auf strukturiertes Wissen als auf analytische Fähigkeiten stützen, geht auch aus einer seltenen Fallstudie hervor, die der Psychologe Neil Charness von der Florida State University in Tallahassee vor einiger Zeit vorlegte. Sie dreht sich um einen anfangs schwachen Spieler, der nach neun Jahren Training 1987 zu einem der führenden kanadischen Schachmeister aufstieg. Wie Charness nachwies, analysierte dieser Spieler, in der Veröffentlichung nur mit den Initialen D. H. bezeichnet, trotz des Anstiegs seiner Spielstärke Schachstellungen nicht ausgiebiger als zuvor. Stattdessen baute er auf seine stark verbesserten Kenntnisse solcher Stellungen und damit verbundener Strategien.

In den 1960er Jahren verfolgten Herbert A. Simon und William Chase, beide ▷

▷ an der Carnegie Mellon University in Pittsburgh (Pennsylvania), eine andere Strategie: Sie wollten das Expertengedächtnis besser verstehen lernen, indem sie seine Grenzen erforschten. In gewissem Sinn machten sie da weiter, wo de Groot aufgehört hatte. Sie baten Spieler unterschiedlicher Stärke, sich Stellungen zu merken, die nicht aus Meisterpartien stammten, sondern künstlich konstruiert waren, sodass die Figuren an zufälligen Positionen auf dem Brett standen (siehe Kasten auf S. 39). Unter diesen Umständen fiel die Korrelation zwischen Spielstärke und Erinnerungsvermögen sehr viel geringer aus.

Das Schachgedächtnis erwies sich somit als noch spezifischer als zuvor gedacht; statt auf das Spiel allgemein schien es sogar nur auf typische Stellungen zugeschnitten. Das bestätigte ältere Befunde, wonach Fähigkeiten in einem Gebiet nicht auf andere Bereiche übertragbar sind. Als Erster hatte dies der Psychologe Edward Thorndike schon vor einem Jahrhundert herausgefunden. Er wies damals zum Beispiel nach, dass ein Lateinstudium nicht zu besseren Sprachkenntnissen in Englisch verhilft und dass das Üben geometrischer Beweise keineswegs die Fähigkeit zum logischen Denken im Alltag fördert.

Dicke Gedächtnisbrocken

Simon erklärte den unterschiedlichen Erfolg der Schachmeister beim Rekonstruieren von echten und künstlichen Stellungen mit einem Gedächtnismodell, das auf bedeutungshaltigen Mustern basiert. Für diese Einheiten prägte er den Ausdruck »Chunks«, der sich mit Brocken, Happen oder auch Bündeln übersetzen lässt. Nur mit ihrer Hilfe könnten, so Simon, Schachmeister riesige Mengen an gespeicherter Information handhaben – eine Aufgabe, die das Arbeitsgedächtnis scheinbar überfordert. Der Psychologe George Miller von der Universität Princeton (New Jersey) hatte 1956 nämlich die begrenzte Kapazität dieses Notizblocks im Gehirn nachgewiesen. In seiner wegweisenden Veröffentlichung »Die magische Zahl Sieben plus/minus Zwei« zeigte er, dass Menschen nur fünf bis neun Dinge gleichzeitig im Kopf behalten können.

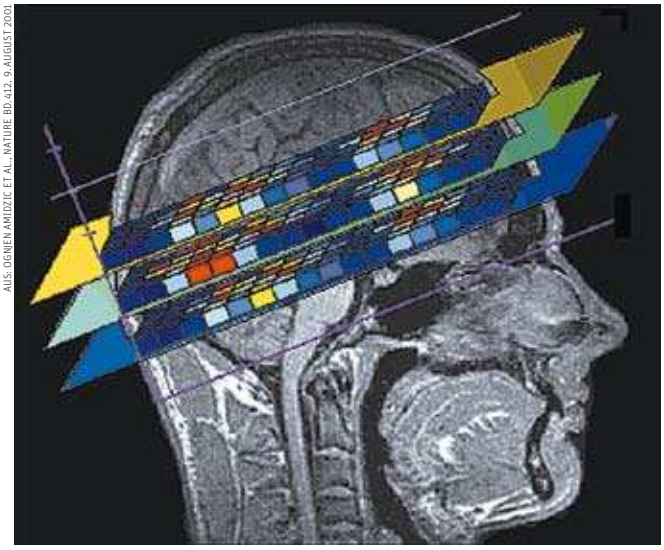
Nach Ansicht von Herbert Simon umgehen Schachmeister diese Limitierung, indem sie Informationen zusammenfassen und als hierarchisch strukturierte Bündel abspeichern. Auf diese Weise können sie sich mit fünf bis neun solchen Brocken statt mit der gleichen Zahl simplerer Informationen auf einmal beschäftigen.

Nehmen wir den Satz »Mary had a little lamb«. Die Zahl der darin enthaltenen Informationsbrocken hängt davon ab, ob jemand das Gedicht kennt und wie gut er die englische Sprache beherrscht. Für die meisten englischen Muttersprachler gehört dieser Satz zu einem viel größeren Bündel – dem bekannten Gedicht. Für jemanden, der Englisch spricht, aber das Gedicht nicht kennt, ist er dagegen ein einzelner, in sich abgeschlossener Informationshappen. Wer die Wörter gelernt hat, aber ihre Bedeutung nicht versteht, hat es mit fünf Brocken zu tun. Und für Personen, die den Satz nur buchstabieren können, sind es 18 Einheiten.

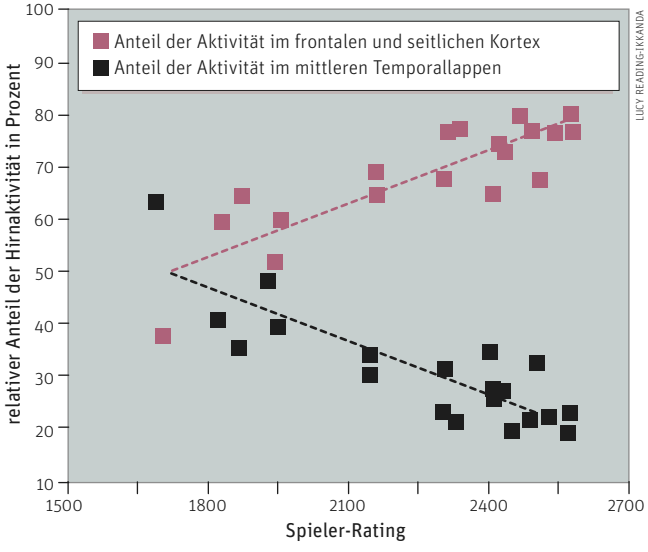
Im Schach lassen sich auf analoge Weise Unterschiede zwischen Amateuren und Großmeistern feststellen. Für einen Anfänger hat ein Brett mit zwanzig Figuren mindestens zwanzig Informationshappen, da er sich für jede Figur die Position einprägen muss. Ein Großmeister hingegen erkennt einen Teil der Stellung etwa als »Rochade mit Fianchetto auf dem Damenflügel« und einen anderen als »blockierte königs-indische Bauernkette«. So muss er die ganze Position vielleicht in nur fünf bis sechs Brocken unterteilen.

Simon hat die Zeit gemessen, die nötig ist, um einen neuen Happen im Gedächtnis zu speichern, und zugleich ermittelt, wie lange ein Spieler Schachstudien betreiben muss, bis er Großmeisterstärke erreicht. Daraus ergab sich durch simple Division, dass ein typischer Großmeister Zugriff auf ungefähr 50 000 bis 100 000 Schachinformationsbündel hat. Jedes vermag er aus dem Gedächtnis

Forscher haben an Probanden, die gegen einen Computer Schach spielten, die von Hirnströmen erzeugten Magnetfelder gemessen. Bei schwächeren Spielern (Bild links und linke Seite des Diagramms rechts) war der mittlere Temporallappen (links in den kolorierten Schnitten) aktiver als der frontale und seitliche Kortex (rechts in den Schnitten). Demnach analysierten Anfänger primär die ihnen nicht vertrauten Züge. Großmeister dagegen zeigten das umgekehrte Aktivierungsmuster (rechts im Diagramm rechts), was darauf schließen lässt, dass sie in erster Linie Informationen aus dem Langzeitgedächtnis abriefen.



AUS: OGNIEN AMIDZIC ET AL., NATURE BD. 412, 9. AUGUST 2001



LUCY READING-IKKANDA

abzurufen, wenn er auf eine entsprechende Stellung blickt – so wie ein englischer Muttersprachler das komplette Gedicht »Mary had a little lamb« aufsagen kann, wenn er die ersten paar Wörter hört.

So überzeugend die Chunk-Theorie klingt, erwies sie sich in gewisser Hinsicht jedoch als unzulänglich. Zum Beispiel kann sie einige Aspekte des Gedächtnisses nicht erklären. Dazu gehört etwa die Fähigkeit von Experten, ihre Höchstleistungen selbst dann noch zu erbringen, wenn sie abgelenkt werden – eine beliebte Taktik bei Gedächtnisstudien. Deshalb glauben K. Anders Ericsson von der Florida State University und Charness, dass es einen Mechanismus geben muss, durch den Experten ihr Langzeitgedächtnis wie einen Arbeitsspeicher nutzen können.

»Dass hochklassige Spieler mit fast normaler Stärke Blindpartien spielen können, ist mit der Chunk-Theorie kaum erklärbar«, sagt Ericsson. »Denn man muss die Stellung kennen und sie dann im Gedächtnis erkunden.« Das aber erfordert eine Abwandlung der gespeicherten Informationsbrocken – als gelte es, »Mary had a little lamb« rückwärts aufzusagen. Es ist machbar, aber keineswegs einfach – und man würde sich dabei öfter verhaspeln. Dennoch spielen Großmeister auch unter Zeitdruck Blindpartien auf erstaunlich hohem Niveau.

Denken in Schablonen

Ericsson verweist zudem auf Untersuchungen an Ärzten, wonach diese für manche Diagnosen mehr als fünf bis neun Informationsbrocken aus ihrem Langzeitgedächtnis kombinieren. Als einfachsten Beleg für die Unzulänglichkeit der Chunk-Theorie nennt er Lesetests. Bei einer Untersuchung, die er 1995 zusammen mit Walter Kintsch von der Universität von Colorado durchführte, schafften sehr geübte Leser nach Unterbrechungen fast ohne Verzögerung den Wiedereinstieg in den Text; am Ende hatten sie meist nur wenige Sekunden verloren.

Die Forscher erklären das mit einer Struktur, die sie Langzeit-Arbeitsgedächtnis nennen – eine scheinbar widersprüchliche Bezeichnung, da sie dem Langzeitgedächtnis etwas zuschreibt, was bislang stets als inkompatibel mit ihm definiert wurde: die Denkfähigkeit.

Hirnbild-Studien an der Universität Konstanz aus dem Jahr 2001 stützen diese Annahme indes. Demnach aktivieren Schachspieler auf Expertenniveau ihr Langzeitgedächtnis viel stärker als Anfänger (siehe Bild auf S. 40 rechts).

Fernand Gobet von der Londoner Brunel-Universität vertritt dagegen eine andere Theorie, die er gemeinsam mit Simon Ende der 1990er Jahre aufgestellt hat. Sie erweitert die Idee der Informationshappen, indem sie sehr große, hochgradig typisierte Anordnungen aus vielleicht einem Dutzend Schachfiguren einbezieht. Eine solche Schablone *(template)* – so der Ausdruck dafür – hätte eine Reihe von variablen Positionen, an denen sich Figuren austauschen lassen.

Ein Beispiel wäre etwa die »isolierte Damenbauern-Stellung aus der nimzoindischen Verteidigung«. Ein Schachmeister könnte darin eine Position abwandeln und die Stellung als dieselbe »abzüglich der Läufer auf den schwarzen Feldern« klassifizieren. Bezogen auf unser Gedichtbeispiel, wäre das so ähnlich, wie sich ein Variante zu merken, in der einzelne Wörter durch andere, sich darauf reimende ersetzt werden – wie »Mary« durch »Larry« oder »school« durch »pool«. Wer das Original kennt, sollte in der Lage sein, die Variante im Nu im Gedächtnis zu behalten.

In einem Punkt stimmen alle Theoretiker überein: Es erfordert einen enormen Aufwand, all die Informationsstrukturen im Gehirn zu verankern. Simon formulierte eine Regel, wonach es ungefähr zehn Jahre harter Arbeit kostet, auf irgendeinem Gebiet ein Meister zu werden. Selbst so genannte Wunderkinder wie Gauß in der Mathematik, Mozart in der Musik oder Bobby Fischer im Schach müssen solch ein intensives Training durchlaufen haben – wahrscheinlich fingen sie nur früher damit an und mühten sich mehr als andere.

Vor diesem Hintergrund erscheint die sprunghafte Vermehrung von Schach-Wunderkindern in den letzten Jahren lediglich als Folge der rasanten Fortschritte in der Computertechnik und -programmierung. Dadurch haben Kinder heute Zugriff auf elektronische Datenbanken, mit denen sie weitaus mehr Großmeisterpartien nachspielen und studieren können als je zuvor. Zudem verfügen sie mit modernen Schachprogrammen über Gegner höchster Spielstärke, die für frühere Generationen unerreichbar waren. Fischer machte 1958 Schlagzeilen, als er im Alter von nur fünfzehn Jahren Großmeister wurde. Der heutige Rekordhalter, Sergej Karjakin aus der Ukraine, schaffte es mit zwölf Jahren und sieben Monaten.

Laut Ericsson kommt es nicht auf das Praktizieren an sich an, sondern auf das, was er »angestrengtes Üben« nennt. Das bedeutet, sich stets Herausforderungen zu stellen, denen man gerade eben noch nicht gewachsen ist. Aus diesem Grund kann jemand Zehntausende von Stunden Schach, Golf oder ein Musikinstrument spielen, ohne jemals über das Amateurniveau hinauszukommen, während ein anderer, richtig unterrichteter Schüler ihn relativ schnell überflügelt. Die mit Schachspielen verbrachte Zeit – auch bei Turnieren – trägt offensichtlich nur wenig zum Fortschritt eines Spielers bei. Der größte Wert normaler Partien ist, Schwächen aufzudecken, die es dann durch gezieltes Training zu beseitigen gilt.

Die meisten Anfänger praktizieren Ericssons angestrengtes Üben. Aus die- ▷

sem Grund machen sie – etwa beim Golfspielen oder Autofahren – zunächst oft so schnelle Fortschritte. Haben sie jedoch ein akzeptables Leistungsniveau erreicht – wenn sie also mit ihren Golf-Freunden mithalten können oder den Führerschein besitzen –, lehnen sich viele Menschen entspannt zurück. Sie geben sich mit ihrem Können zufrieden und erbringen ihre Leistungen fortan »automatisch«, ohne sich mehr zu bemühen als nötig. Dadurch verbessern sie sich kaum noch.

Im Gegensatz dazu lassen angestrengt Übende nicht nach und steigern ihre Ansprüche immerzu: Sie analysieren ihre Leistung selbstkritisch, ziehen Lehren daraus und setzen sich höhere Ziele. So füllen sie ihr Langzeitgedächtnis mit immer weiteren Informationshappen und Schablonen, bis sie das Niveau der Besten auf ihrem Gebiet erreicht haben oder es sogar übertreffen.

Tatsächlich wird die Messlatte für wahres Könnertum heute auf fast allen Gebieten ständig angehoben. Das gilt nicht nur für den Sport, wo das Leistungsniveau insbesondere an den Schulen stetig steigt. Auch Musikstudenten an Konservatorien etwa spielen inzwischen Stücke, an die sich früher nur Virtuosen wagten. Im Schach haben die Ansprüche im Lauf der Zeit am deutlichsten zugenommen.

Der britische Schachgroßmeister John Nunn, der zugleich Mathematiker ist, verglich kürzlich mit Hilfe eines Computers die Fehler, die in zwei internationalen Turnieren – eins aus dem Jahr 1911, das andere von 1993 – begangen wurden. Bei dem neueren patzten die Spieler, wie sich zeigte, sehr viel weniger.

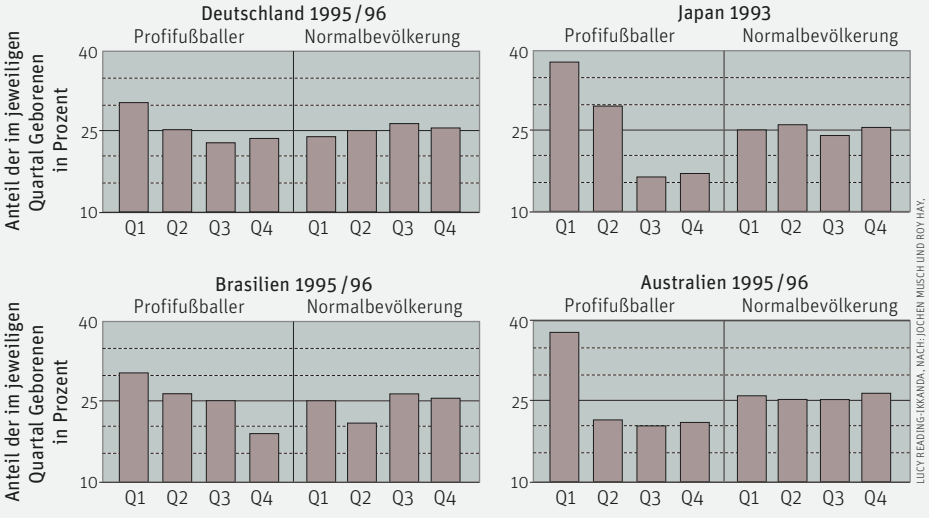
Außerdem analysierte Nunn alle Partien eines Teilnehmers aus dem 1911er Turnier, der seinerzeit einen Mittelplatz belegt hatte, und ermittelte daraus sein heutiges Rating. Es läge nur bei 2100 Punkten – hundert unter Großmeisterniveau. Die damaligen Schachgrößen waren zwar deutlich stärker, könnten sich mit den momentanen Topspielern aber nicht messen.

Capablanca und seine Zeitgenossen hatten eben weder Computer noch Datenbanken zur Verfügung. Sie waren bei ihrem Ringen um Meisterschaft ganz auf sich selbst gestellt – wie Bach, Mozart und Beethoven. Spieltechnisch könnten sie mit den heutigen Weltbesten deshalb nicht mithalten. Doch dafür glänzten sie in puncto Kreativität. Ähnliches dürfte für Newton im Vergleich mit typischen frischgebackenen Physikdoktoranden aus unserer Zeit gelten.

An dieser Stelle verlieren Skeptiker meist die Geduld. Mit Sicherheit, sagen sie, braucht es mehr als ausdauerndes Training, zum unsterblichen Genie zu werden. Für diesen Glauben an die Bedeutung angeborenen Talents, der in der Öffentlichkeit weit verbreitet ist, gibt es indes keinerlei harte Belege. Wissenschaftliche Studien zeigen eher das Gegenteil. So fand Gobet im Jahr 2002 bei einer Untersuchung an britischen Schachspielern von Amateuren bis zu Großmeistern keinerlei Zusammenhang zwischen Spielstärke und räumlich-visuellen Fähigkeiten, die er mit Form-Erinnerungstests ermittelte. ▷

Training wichtiger als Talent

Nach den Ergebnissen einer Untersuchung von 1999 verdanken Profifußballer ihre Karriere mehr ihrer besonders starken Motivation als einer natürlichen Begabung. Die berufsmäßigen Spieler aus Deutschland, Brasilien, Japan und Australien waren mit überdurchschnittlich hoher Wahrscheinlichkeit im ersten Quartal (Q1) nach dem alljährlichen Saisonstart geboren (Diagramme rechts). Dadurch kamen sie als Kinder immer in etwas höherem Alter in die jahrgangsabhängigen Jugendspielklassen als die anderen, sodass sie meist größer und kräftiger waren. Das machte sie tendenziell erfolgreicher und motivierte sie so zu verstärkten Anstrengungen. Deshalb landeten diese Kinder später besonders häufig in der Profi-Liga. Ausnehmend starke Motivation und intensives Training dürften auch die Meisterschaft des US-Golfspielers Tiger Woods (unten rechts) und die Genialität des österreichischen Komponisten Wolfgang Amadeus Mozart (unten links) erklären.



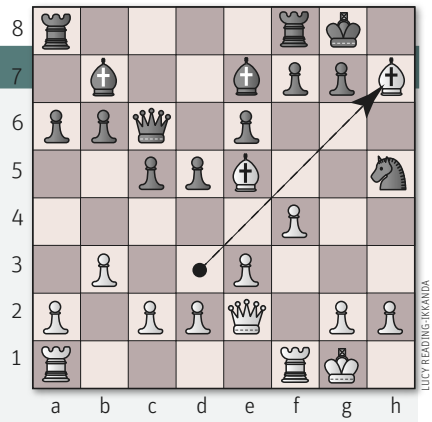
LUCY READING-IKKANDA, NACH: JOCHEN MUSCH UND ROY HAY, THE RELATIVE AGE EFFECT IN SOCCER, SOCIOLOGY OF SPORT JOURNAL BD.16, 1999

BRIDGEMAN (PETER A. LORENZONI, 1763; MOZART-MUSEUM SALZBURG)

CORBIS, ALAN LEVENSON

Anmerkung: Saisonstart ist in Deutschland, Brasilien und Australien am Ende, in Japan dagegen zu Beginn des Sommers. Als Stichtag für die Untersuchung wurde folglich der 1. August beziehungsweise der 1. April festgelegt.

Der versteckte Gewinnzug



Weiss gewinnt, indem der Läufer auf d3 den Bauern auf h7 mit Schach schlägt. Der schwarze König nimmt den Läufer, und die weiße Dame schlägt den schwarzen Springer auf h5, ebenfalls mit Schach. Dadurch muss der schwarze König zurück auf das Feld g8. Jetzt nimmt der zweite weiße Läufer den Bauern auf g7 und wird dort vom schwarzen König geschlagen. Das doppelte Läufer-Opfer ebnet den Weg für einen Dame-Turm-Angriff, der Schwarz schließlich dazu zwingt, die Dame zu opfern, um ein Matt zu vermeiden. Emanuel Lasker, der Gewinner des Spiels, wurde 1894 Schachweltmeister und hielt den Titel 27 Jahre lang, ehe er von José Raúl Capablanca abgelöst wurde.

Obwohl es bislang noch niemandem gelungen ist vorherzusagen, wer ein Genie auf einem Gebiet werden wird, demonstriert ein bemerkenswerter Versuch die prinzipielle Möglichkeit, gezielt überragende Könner heranzuziehen. Der ungarische Lehrer László Polgar trainierte seine drei Töchter bis zu sechs Stunden täglich in Schach und machte sie so zu den am stärksten spielenden Geschwistern aller Zeiten. Zwei erreichten – als erste Frauen überhaupt – Großmeisterniveau, und die dritte schaffte es immerhin zur internationalen Meisterin. Die jüngste, die dreißigjährige Judit, steht nun auf Platz 14 der Weltrangliste.

Die Rolle der Motivation

Schachgroßmeister lassen sich also produzieren. Es ist sicher kein Zufall, dass die Zahl der Schachwunderkinder nach dem Erscheinen von Polgars Buch über seine Trainingsmethoden emporschnellte. In ähnlicher Weise schossen vor zwei Jahrhunderten musikalische Wunderkinder aus dem Boden, nachdem Mozarts Vater gezeigt hatte, wie man sie züchtet.

Auf dem Weg zur Genialität scheint Motivation ein wichtigerer Faktor zu sein als angeborene Fähigkeiten. Nicht ohne Grund wird besonders auf Gebieten wie Musik, Schach und Sport, in denen statt akademischer Titel das gute Abschneiden in Wettbewerben als Ausweis von Könnertum gilt, ein hohes Niveau in immer jüngeren Jahren erreicht – unter Anleitung entsprechend ehrgeiziger Eltern und Verwandter.

Dabei begünstigt ein Erfolg den nächsten, indem er die Motivation steigert. Eine 1999 durchgeführte Untersuchung an Profifußballern aus mehreren Ländern ergab, dass ihr Geburtstag überdurchschnittlich häufig in das Quartal nach dem alljährlichen Saisonbeginn fiel (siehe Kasten links). Dadurch kamen die späteren Berufskicker vom Beginn ihrer Karriere an immer in etwas höherem Alter in die jeweilige Jugendspielklasse als die übrigen Kinder, sodass sie meist größer und kräftiger waren als ihre Mitspieler. Das machte sie tendenziell erfolgreicher und motivierte sie so zu verstärkten Anstrengungen.

Dennoch glauben Lehrer in Sport, Musik und anderen Disziplinen weiterhin, dass es primär auf das Talent ankäme, und halten sich für fähig, diese innere Befähigung zu erkennen. Dabei dürften sie jedoch Begabung mit Frühreife verwechseln. Bei einer Vorspielprobe lässt sich nicht unterscheiden, ob ein junger Violinist seine Qualitäten seinem vermeintlichen Talent oder etwa jahrelanger Musikerziehung nach der Suzuki-Methode verdankt.

Capablanca, der bis heute als einer der größten »geborenen« Schachspieler gilt, brüstete sich damit, nie gezielt trainiert zu haben. Dem widerspricht jedoch, dass zu den Gründen, warum er von der Columbia-Universität flog, übermäßiges Schachspielen gehörte. Demnach war seine berühmte Gabe, eine Stellung mit einem Blick zu erfassen, in Wahrheit wohl doch das Ergebnis fortwährenden Übens auf Grund seiner Schachbesessenheit – und keineswegs naturgegeben.

Die erdrückende Mehrheit psychologischer Untersuchungen belegt: Genies werden »gemacht« und nicht als solche geboren. Wenn nun aber alles darauf hindeutet, dass sich im Grunde jedes Kind bei entsprechender Förderung schnell zu einem Könner – im Schach, in der Musik und auf vielen anderen Gebieten – heranziehen lässt, sind Lehrer und Erzieher gefordert. Dieselben Methoden, die künftige Genies zu angestrengtem Üben bringen, sollten allen Schülern helfen, etwa ihre Lese- und Rechenfähigkeiten zu verbessern. Roland G. Fryer jr., Ökonom an der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts), hat in leistungsschwachen Schulen in New York und Dallas versuchsweise mit finanziellen Anreizen gearbeitet. So führen in einem noch laufenden Projekt in New York die Lehrer alle drei Wochen Tests durch; wer gut abschneidet, erhält zur Belohnung kleine Summen zwischen zehn und zwanzig Dollar.

Die bisherigen Ergebnisse sind viel versprechend. Statt ewig über die Frage »Warum kann Johnny nicht lesen?« nachzugrübeln, sollten sich Lehrer also lieber fragen: »Warum sollte es irgendetwas auf der Welt geben, das er nicht lernen kann?« ◁

Philip E. Ross ist externer Redakteur bei Scientific American und selbst Schachspieler. In seiner Spielstärke liegt er 199 Punkte hinter seiner Tochter Laura, einer Nationalen Meisterin.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

The Cambridge handbook of expertise and expert performance. Von Neil Charness, Paul J. Feltovich, Robert R. Hoffman und K. Anders Ericsson. Cambridge University Press, 2006

Moves in mind: the psychology of board games. Von Fernand Gobet, Alex de Voogt und Jean Retschitzki. Psychology Press, 2004

Expert performance in sports: advances in research on sport expertise. Von Janet L. Starkes und K. Anders Ericsson. Human Kinetics, 2003

The rating of chessplayers, past and present. Von Arpad E. Elo. Acro Publishing, 1978

Thought and choice in chess. Von Adriaan de Groot. Mouton, 1978

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/858960.

DUALES SYSTEM

Aus alt wird neu

Bei ständig wachsenden Abfallmengen gewinnen fortschrittliche Recyclingtechnologien immer mehr an Bedeutung. So werden Kunststoffe in hochmodernen Sortieranlagen mit Infrarotlicht separiert und in den Wertstoffkreislauf zurückgeführt.

Von Edgar Lange

Mehr als vier Millionen Tonnen wiederverwertbarer Abfall entstehen Jahr für Jahr in Deutschland. Während Glas und Papier separat gesammelt werden, kommen gebrauchte Leichtverpackungen aus Kunststoff, Weißblech, Aluminium und Verbundmaterialien gemeinsam in eine farblich gekennzeichnete Tonne beziehungsweise den Gelben Sack. Um diesen Abfall kümmert sich die Duale System Deutschland GmbH (DSD), seit 2006 in Konkurrenz mit den Unternehmen Landbell und Interseroh. Basis ihrer Arbeit ist die Verpackungsverordnung von 1991, die den Herstellern ebenso wie den Vertreibern von Produkten eine Rücknahme und Wiederverwertung von Verpackungen vorschreibt. Das Duale System übernimmt stellvertretend diese Verpflichtung, Handel und Industrie kaufen sich sozusagen frei, sichtbarer Ausdruck entsprechender Lizenzverträge ist der Grüne Punkt. Die dafür anfallenden Gebühren werden allerdings auf die Endpreise umgelegt, alljährlich kostet das jeden Verbraucher etwa 21 Euro.

Der Verpackungsmüll wird heutzutage überwiegend in 170 vollautomatischen und computergesteuerten Sortieranlagen verarbeitet. Dort wird der Abfall in drei Schichten rund um die Uhr über Fließbänder den verschiedenen Stationen zugeführt. In der ersten wird ein Sack aufgerissen und sein Inhalt auf dem Fließband verteilt. Arbeiter überwachen den Vorgang und lesen größere Objekte wie beispielsweise Toilettendeckel heraus. Was nun in die Anlage gelangt, passiert rotierende Siebtrommeln, durch deren Löcher grober Schmutz fällt. Rüttelsiebe lockern den Verpackungsmüll auf. Es folgen Windsichter (das sind leistungsstarke Ventilatoren); sie blasen leichtes Material auf ein höher gelegenes Fließband.

Dazu zählen Kunststoffabfälle, die vor ihrer Verwertung nach Arten getrennt werden, um die einzelnen Fraktionen bei der richtigen Temperatur zu schmelzen. So schmilzt PET bei 260 Grad Celsius, PVC bei 210 Grad und Polypropylen schon bei 160 Grad. Dazu werden die Objekte mit Halogenlicht mit einem Spektrum im Nah-Infrarot-Bereich beleuchtet, also bei Wellenlängen zwischen 0,7 und 4 Mikrometern. Das Licht regt die Moleküle zum Schwingen an, verschiedene Kunststoffe absorbieren unterschiedliche Wellenlängen, das reflektierte Infrarotlicht zeigt deshalb ein von der Kunststoffart abhängiges Spektrum. Es wird innerhalb von Millisekunden erfasst. Druckluft fegt ein klassifiziertes Objekt dann sofort vom Band in verschiedene Kanäle. Von Hand wird lediglich noch eine Qualitätskontrolle durchgeführt.

Bei den anderen schwereren Stoffen, die auf dem Band liegen bleiben, ziehen magnetische Abscheider Eisen und Stahl sowie Aluminium und andere Metalle aus dem Strom. Was übrig bleibt, kommt zur Müllverbrennung, denn es darf seit Kurzem nicht mehr unbehandelt deponiert werden. Da eine 100-prozentige Trennung aller Fraktionen nicht möglich ist, gibt es am Ende des Prozesses aber auch Mischfraktionen, etwa aus Mischkunststoffen, oder wenn sich der Aludeckel nicht vom Jogurtbecher trennen ließ. Daraus entsteht unter anderem ein Granulat, das sich noch für neue Parkbänke verwenden lässt.

Nach den Rohstoffen getrennt wird der Abfall nun zu Ballen gepresst und in Wertstoffkreisläufe eingespeist: Metalle kommen in die Schmelzhütten, Plastik wird stofflich oder chemisch recycelt.

Das stoffliche Recycling eignet sich nur für Thermoplaste, also Kunststoffe, die bei höheren Temperaturen zu schmelzen beginnen. Das sind aber siebzig Prozent aller verwendeten Kunststoffe. Wärmeenergie trennt die miteinander verflochtenen Makromoleküle. Der chemische Aufbau bleibt dabei weit gehend erhalten, das Ergebnis ist nach dem Abkühlen ein Granulat, das sich zu Kabelrohren, Rasengittersteinen, Palisaden oder gar Gelben Tonnen weiterverarbeiten lässt. Lediglich aus sortenreinem Polyethylenterephthalat (PET) werden tatsächlich wieder neue Getränkeflaschen. Für Duroplasten kommt hingegen das chemische Recycling infrage, bei dem der Kunststoff in Öle und Gase aufgespalten wird, die dann wieder als Ausgangsmaterialien der Kunststoffherstellung dienen. In beiden Fällen spart das Recycling Rohstoffe und Energie.

Um es allen Beteiligten noch einfacher zu machen, soll künftig sogar die Trennung des Wertstoffabfalls von Bio- und Restmüll entfallen. Damit Saftflaschen und Jogurtbecher genauso wie Konservendosen und Bananenschalen in eine gemeinsame Tonne dürfen, muss der Hausabfall beim Entsorger gut zerkleinert und von Metallen befreit werden. Beim so genannten Trockenstabilatverfahren kommt er anschließend in riesige Boxen aus Stahlbeton. Sechs Tage lang rottet der Abfall vor sich hin, in dieser Zeit zersetzen Mikroorganismen die organischen Stoffe. Gebläse sorgen für Sauerstoffzufuhr. Danach wird die Luft wie mit einem überdimensionalen Fön getrocknet. Die Mischung aus Kunststoffen, Papier und Holz bildet dann das »Trockenstabilat«. Es eignet sich etwa als Zusatz in der Zementherstellung oder als Brennmaterial in Kraftwerken, das problemlos lagerbar ist und den Heizwert von Braunkohle hat. ◁

Der Autor **Edgar Lange** ist Technikjournalist in Düsseldorf.

Wussten Sie schon?

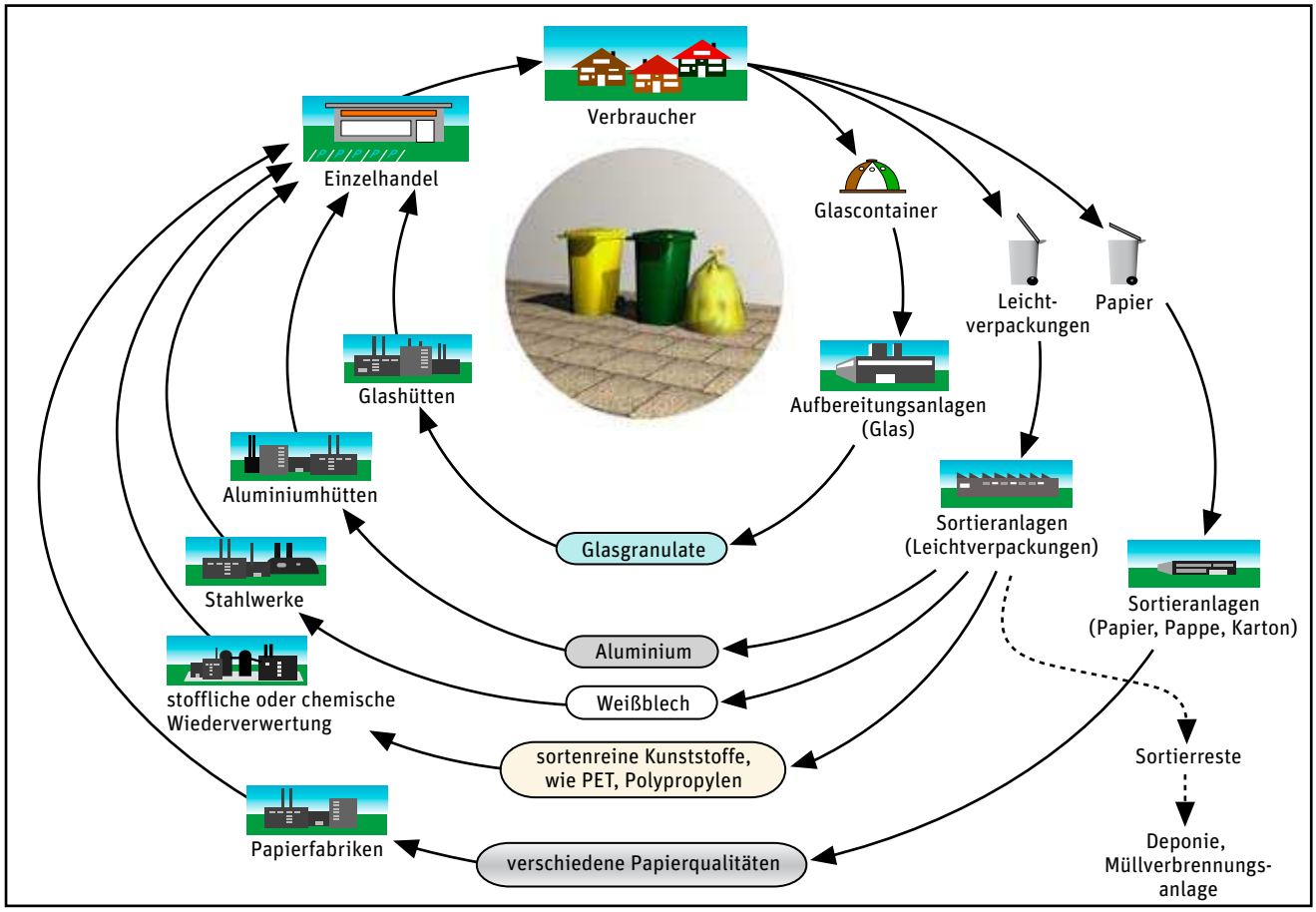
▶ Etwa **26 Kilogramm Leichtverpackungen**, 25 Kilo Glas und 11,5 Kilogramm Papier, Pappe und Karton werden im Mittel pro Jahr von jedem Bundesbürger gesammelt. Mindestens 60 Prozent davon müssen gemäß der Verpackungsverordnung wiederverwertet werden, erreicht werden derzeit 71 Prozent bei Verbundverpackungen und bei Aluminium 156 Prozent – die Verbraucher entsorgen auch reine Aluminiumprodukte wie Folien oder Töpfe im Verpackungsmüll.

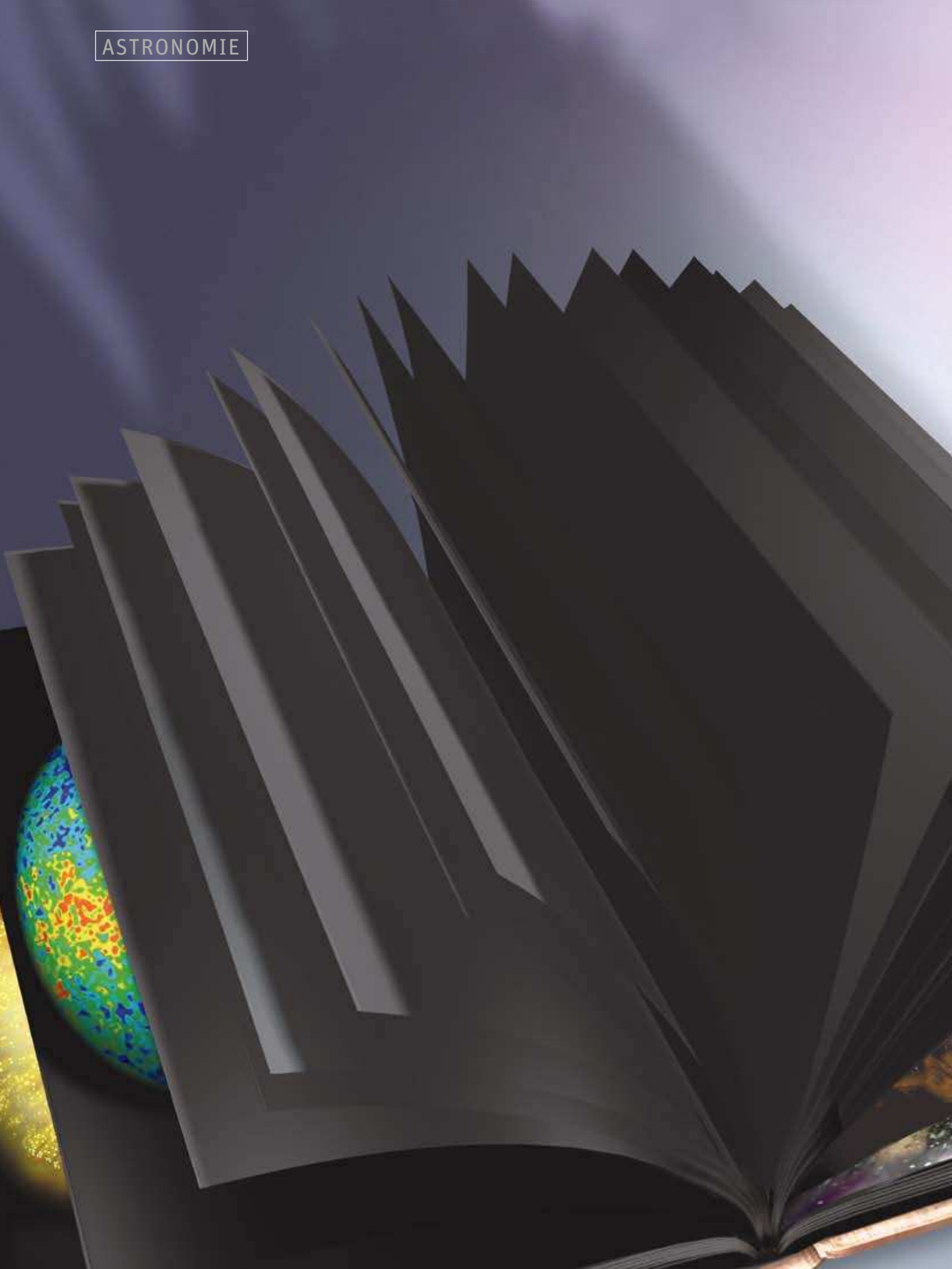
▶ Mehr als **zwei Milliarden CDs** wurden 2005 verkauft, als Tonträger, Foto-CDs oder Datenträger. Bei ihrer Produktion fiel zudem Ausschuss und Produktionsabfall an. In Dormagen bei Neuss steht deshalb die erste CD-Recyclinganlage Europas. Der Materialverbund aus durchsichtigem Polykarbonat und der aufgedampften Aluminiumschicht wird hier getrennt: Die CDs werden zerkleinert, dann wird die Metallschicht in einer Lauge abgelöst. Übrig bleibt der Kunststoff, die Lösung wird über eine Kläranlage gereinigt, der entstehende Klärschlamm verbrannt.

▶ Das Duale System kostet, doch es spart auch. Insgesamt verbraucht die chemische Industrie so bei der Herstellung von Kunststoffen rund **250 000 Tonnen Rohöl** weniger, das entspricht etwa 105 Millionen Litern Normalbenzin. Der für die Verarbeitung von Rohstoffen notwendige Energieeinsatz sank um 73,2 Milliarden Megajoule, umgerechnet in elektrische Energie können die fast 38 Millionen deutschen Haushalte damit 200-mal im Jahr Wäsche waschen. Da weniger fossile Brennstoffe in Kraftwerken verbrannt werden mussten, gelangte auch eine Million Tonnen weniger klimaschädliches Kohlendioxid in die Atmosphäre.

▶ Siedlungsabfall darf seit Juni 2005 nicht mehr deponiert werden, um den Ausstoß an Methan zu reduzieren. Müllverbrennungsanlagen sind deshalb sehr gefragt. Die Länderarbeitsgemeinschaft Abfall schätzt ihre Kapazitäten auf etwa **18 Millionen Tonnen Müll** pro Jahr, die von Verbrennungsanlagen der Energiewirtschaft und der Industrie, in denen Hausmüll mitverbrannt werden kann, auf weitere drei Millionen Tonnen.

Das Duale System soll für einen weit gehend geschlossenen Materialkreislauf sorgen: Abfälle auf Kunststoffen, Glas, Papier und Metallen werden gesammelt, sortiert, aufbereitet und die Produkte nach Möglichkeit wiederverwertet.





Die dunkle Ära des Universums

Vor dem Aufleuchten der ersten Sterne war das All finster. Astronomen erkunden nun diese Epoche und suchen darin nach Strukturen, aus denen später Galaxien wurden.

Von Abraham Loeb

Kosmologen beschäftigen sich mit grundlegenden Fragen, welche die Menschen bereits seit Jahrhunderten umtreiben: Was ist der Ursprung der Welt? Wie entstanden die Himmelskörper? Heute versuchen wir, darauf mit systematischen Beobachtungen und physikalischen Theorien Antworten zu finden. Dass es heute ein Modell des Universums gibt, welches viele unserer Beobachtungen miteinander in Einklang bringt, ist eine der größten wissenschaftlichen Errungenschaften des vergangenen Jahrhunderts.

Oft wird unterschätzt, dass ein solches Modell auch für unsere Gesellschaft wertvoll ist. Wenn ich morgens die Tageszeitung lese, erfahre ich von Konflikten zwischen Menschen um Grenzen, Besitztümer oder Freiheitsrechte. Viele dieser Nachrichten sind nach kurzer Zeit vergessen. Öffne ich jedoch ein altes Buch wie die Bibel, das Generationen von Menschen in seinen Bann zog, lese ich einen Bericht über die Erschaffung von Licht, Sternen und Leben als Bestandteilen des Universums. Natürlich bleibt den Menschen nichts anderes übrig, als sich mit ihren alltäglichen Problemen zu befassen. Als Bewohner des Universums fragen wir uns aber auch, wie die ersten Sterne aufleuchteten, wie das Leben entstand und ob wir die einzigen intelligenten Wesen in den Weiten des Alls sind. Im 21. Jahrhundert könnte es Astronomen gelingen, diese großen Fragen zu beantworten. Dass wir auf Grund der endlichen Geschwindigkeit des Lichts in die Vergangenheit blicken, ist für den Erfolg der Kosmologie als empirischer Wissenschaft entscheidend.

Stehen wir einen Meter vor einem Spiegel, sehen wir darin, wie wir vor sechs milliardstel Sekunden aussahen, denn diese Zeit benötigt das Licht, um von unserem Gesicht zum Spiegel und dann zu unseren Augen zu gelangen. Durch ein Teleskop empfangen wir Licht, das viel länger unterwegs war. Statistisch gesehen sieht das Universum in allen Richtungen gleich aus, und so können wir annehmen, dass unsere kosmische Nachbarschaft vor Milliarden von Jahren einer entfernten Region ähnelte, von der uns das Licht nach einer langen Reise erst heute erreicht.

Lückenhafte Weltgeschichte

Kosmologen wollen die gesamte Geschichte des Kosmos lückenlos kennen lernen. Bislang war für sie die Hintergrundstrahlung der wichtigste Befund aus der Frühzeit der Welt. Diese Strahlung wurde etwa 380 000 Jahre nach dem Urknall freigesetzt und ist ein Schnappschuss der so genannten Rekombination, als sich leichte Atomkerne und Elektronen erstmals zu elektrisch neutralen Atomen verbanden. Geringe Temperaturunterschiede in dieser Strahlung zeigen, dass die kosmische Massendichte damals winzige Schwankungen aufwies. Erst vom Ende der ersten Jahrmilliarde haben wir mit sehr jungen Galaxien die nächsten sichtbaren Anhaltspunkte. Erwies sich für deren Beobachtung das Weltraumteleskop Hubble bereits als nützlich, soll dessen Nachfolger, das James Webb Space Telescope, ab dem Jahr 2013 sogar die ersten Galaxien im Kosmos aufspüren. Theoretiker vermuten, dass diese einige hundert Millionen Jahre nach dem Urknall entstanden sind. ▷

JEAN-FRANÇOIS PODEVYN

10^{-33} Sekunden
Die kosmische Inflation erzeugt Keime für die Verdichtung der Materie.

10^{-43} Sekunden
Raum und Zeit können voneinander unterschieden werden.

10^{-4} Sekunden
Protonen entstehen.

70 000 Jahre
Materie wird zur dominierenden Komponente des Kosmos, ihre Verdichtungen wachsen an.

380 000 Jahre
Rekombination: Neutrale Atome entstehen, die Hintergrundstrahlung wird freigesetzt.

10 000 Jahre

100 000 Jahre

eine Million Jahre

MASSACHUSETTS INST. OF TECHNOLOGY, MAX TEGMARK

Das dunkle Zeitalter begann mit der Freisetzung der Hintergrundstrahlung (380 000 Jahre nach dem Urknall) und endete etwa eine Milliarde Jahre später. Ungefähr 100 Millionen Jahre nach dem Urknall setzte die Reionisation ein, kurz nachdem die ersten Sterne und Galaxien entstanden waren.

▷ Auch wenn diese Beobachtungen gelingen, bleibt eine große Lücke in der Chronik des Kosmos offen. Zwischen dem Zeitpunkt, als die Hintergrundstrahlung freigesetzt wurde, und dem Aufleuchten der ersten Sterne war das Universum dunkel und die Hintergrundstrahlung spiegelte nicht länger die Verteilung der Masse wider. Das klingt zunächst nach einem langweiligen Intermezzo zwischen den dramatischen Ereignissen unmittelbar nach dem Urknall und dem lebendigen Geschehen im heutigen Kosmos. Doch tatsächlich prägte das dunkle Zeitalter dessen Entwicklung, denn damals brachte die Schwerkraft die ersten Objekte hervor.

Die kosmische Geschichte stellt sich Forschern heute wie das Fotoalbum einer Person dar, in dem sie das erste Ultraschallbild sowie jeweils ein paar Aufnahmen als Teenager und als Erwachsener vorfinden. Allein daraus auf die Kindheit zu schließen ist aussichtslos, denn schließlich ist ein Kind weder ein vergrößerter Embryo noch ein verkleinerter Erwachsener. Das gilt auch für Galaxien, die sich von ersten Zusammenballungen der Materie, deren Spuren wir in der Hintergrundstrahlung erkennen, keineswegs direkt in ihre heutigen Formen verwandelten. Vielmehr haben sie während des dunklen Zeitalters anscheinend einen komplizierten Übergang durchgemacht.

Von Plasma zu Plasma

Im Fotoalbum des Kosmos wollen die Astronomen jetzt nach fehlenden Bildern aus der frühen Kindheit des Universums suchen, um daraus zu erkennen, wie die Bausteine heutiger Galaxien entstanden. Als ich vor einem Jahrzehnt anfing, darüber nachzudenken, interessierten sich nur wenige Forscher dafür. Inzwischen führte diese Suche zum Bau einer Reihe neuer Teleskope und wird im kommenden Jahrzehnt wohl zum aufregendsten Forschungsfeld der Kosmologie werden.

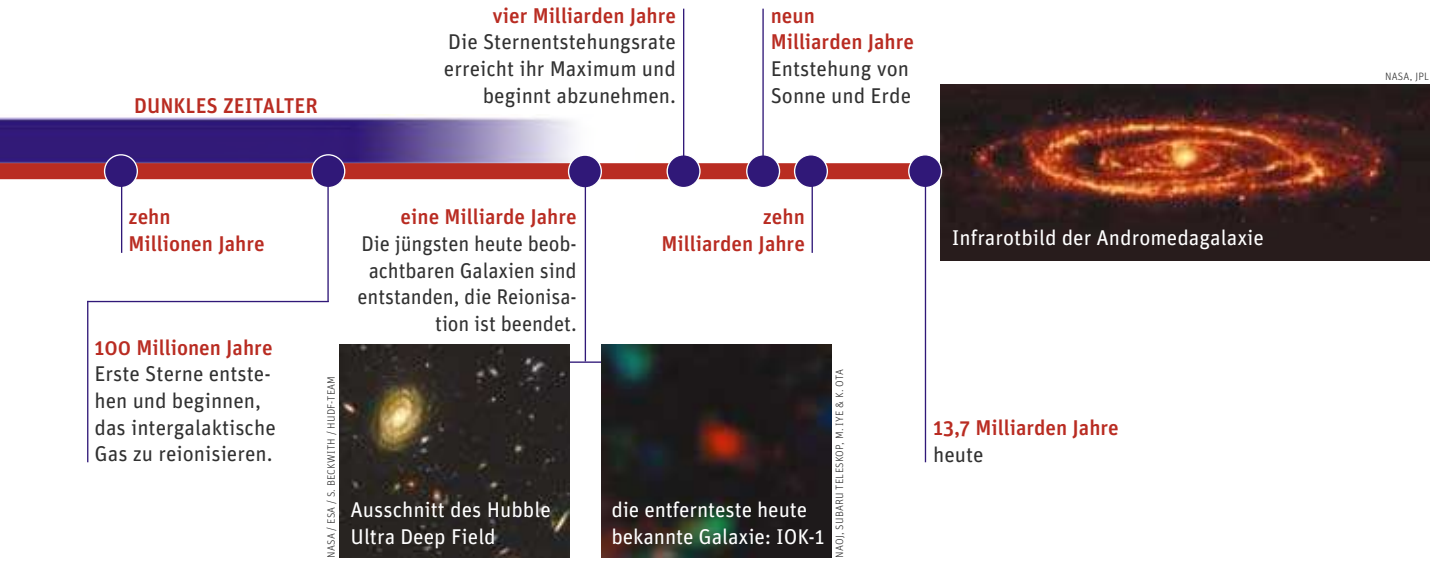
Nach dem Urknall war das Universum von einem heißen Plasma erfüllt – einer Mischung aus Protonen, Elektronen und Photonen mit einer Prise leichter Atomkerne. Durch die so genannte Thomson-Streuung beeinflussten sich die frei beweglichen Elektronen und Photonen gegenseitig, Materie und Strahlung waren miteinander gekoppelt. Auf Grund der Expansion des Kosmos kühlte das Plasma ab, und als die Temperatur unter 3000 Kelvin fiel, verbanden sich Protonen und Elektronen im Prozess der Rekombination zu elektrisch neutralen Wasserstoffatomen. Damit verlor die Thomson-Streuung an Bedeutung, Materie und Strahlung entkoppelten und die Photonen bildeten die kosmische Hintergrundstrahlung. Das Gas kühlte weiter ab und so könnte man vermuten, es müsse bis heute kalt und elektrisch neutral geworden sein.

Doch es kam ganz anders. Zwar besteht unsere kosmische Nachbarschaft aus elektrisch neutralen Atomen, doch der überwiegende Teil der so genannten baryonischen Materie im Universum (die normale Materie aus Atomkernen) ist das ionisierte Plasma des intergalaktischen Raums. Spektren der entferntesten Quasare, Galaxien und Gammastrahlungsausbrüche verraten, dass das diffus verteilte Wasserstoffgas bereits eine Milliarde Jahre nach dem Urknall wieder vollständig ionisiert war (siehe SdW 11/2002, S. 36).

Beobachtungen der Hintergrundstrahlung lieferten in den letzten Jahren erste Hinweise auf den Verlauf der Reionisa-

In Kürze

- Unser Wissen über die **Frühzeit des Universums** stammt zum großen Teil von Beobachtungen der Hintergrundstrahlung, die etwa 380 000 Jahre nach dem Urknall freigesetzt wurde. Doch zwischen diesem Zeitpunkt und dem Auftauchen der ersten Galaxien liegt ein Zeitraum nahezu vollkommener Finsternis, in dem die Geheimnisse der Galaxienentstehung verborgen sind.
- Das dunkle Zeitalter war **nicht völlig finster**: Elektrisch neutrales Wasserstoffgas muss schwache Radiowellen ausgesandt haben, nachdem es durch die Hintergrundstrahlung beleuchtet wurde. Astronomen suchen jetzt nach dieser Strahlung.
- Gelingen ihre schwierigen Beobachtungen, werden sie eine **dreidimensionale Karte** erstellen können, die zeigt, wie die ersten Galaxien in der Frühzeit des Universums entstanden.



tion. Zunächst entdeckten John Carlstrom von der Universität Chicago und seine Kollegen mit dem Instrument Dasi *(Degree Angular Scale Interferometer)*, dass diese Strahlung in charakteristischer Weise polarisiert ist. Neutrales Wasserstoffgas hätte dies nicht bewirken können; das intergalaktische Medium musste also wenigstens teilweise ionisiert sein. Kurz darauf gelang es, aus den umfangreicheren des Satelliten WMAP *(Wilkinson Microwave Anisotropy Probe)* darauf zu schließen, dass die Reionisation bereits mehrere hundert Millionen Jahre nach dem Urknall abgeschlossen war. Demzufolge müssen die in der Rekombination entstandenen neutralen Atome damals wieder in ihre Bestandteile zerfallen sein.

Viele Forscher haben die erste Generation von Sternen als Verursacher der Reionisation in Verdacht, und zwar wegen deren Strahlung. Um ein Wasserstoffatom zu ionisieren, benötigt man eine Energie von 13,6 Elektronenvolt, was einem ultravioletten Photon mit einer Wellenlänge von 911 Nanometern entspricht. Um ein Kilogramm Wasserstoffgas mit Hilfe dieser Strahlung zu ionisieren, braucht man 10^9 Joule – viel weniger als die 10^{15} Joule, welche die Kernfusion der gleichen Wasserstoffmenge freisetzt. Deshalb hätte nur ein Millionstel des gesamten kosmischen Wasserstoffs in Sternen vorliegen müssen, um den gesamten Rest dieses Gases im Kosmos zu ionisieren.

Möglich wäre aber auch, dass die auf Schwarze Löcher einfallende Materie den Wasserstoff ionisierte. Fällt ein Kilogramm Materie in ein Schwarzes Loch, werden bis zu 10^{16} Joule an Energie frei. Lediglich ein Zehnmillionstel des kosmischen Wasserstoffs hätte also in Schwarze Löcher fallen müssen, um den Rest zu ionisieren.

Sowohl Sterne als auch Schwarze Löcher werden in Galaxien geboren, die bereits vor der Reionisation entstanden. Gemeinhin mag man diese Welteninseln als Ansammlungen von Sternen ansehen, doch für Kosmologen sind sie zunächst einmal nur Verdichtungen der kosmischen Materie. Tatsächlich bestehen Galaxien überwiegend aus Dunkler Materie, die selbst unsichtbar ist und sich bislang allein durch ihre Schwerkraft bemerkbar macht. Für den Prozess der Galaxienentstehung ist sie entscheidend, denn sie treibt den Kollaps einer Region an, deren Dichte um einen bestimmten Schwellenwert über derjenigen ihrer Umgebung lag. Schließlich bildet sich ein durch die Schwerkraft gebundenes Objekt – eine Galaxie –, in deren Zentrum erst später Sterne aufleuchten, falls überhaupt jemals.

Galaxien können nur dann entstehen, wenn der gravitative Kollaps die Expansion des Raums in einer Region überwiegt, und das setzt voraus, dass sich die meisten Teilchen der Dunklen Materie langsam bewegen. Trotz ihres unbekannten Wesens ist diese kalte Dunkle Materie eine tragende Säule des kosmologischen Standardmodells.

Computersimulationen zufolge entstanden die ersten Zwerggalaxien etwa 100 Millionen Jahre nach dem Urknall und verschmolzen danach zu größeren Objekten. Unsere heutige Milchstraße könnte aus rund einer Million Zwerggalaxien hervorgegangen sein. Als das Gas der jungen Galaxien abkühlte, bildeten sich die ersten Sterne, die zumeist massereicher waren als unsere Sonne und intensives Ultraviolettlicht aussandten (siehe SdW 2/2002, S. 26).

In weit gehend kugelförmigen Regionen um die Galaxien, deren Radien mit Lichtgeschwindigkeit anwuchsen, entriss diese Strahlung den Atomen ihre Elektronen und ließ ionisiertes Gas zurück. Mit jeder neuen Galaxie entstand eine weitere dieser ionisierten Regionen und das intergalaktische Gas ähnelte immer mehr einem Schweizer Käse. Irgendwann überlappten sich die Blasen und erfüllten schließlich den gesamten Raum.

Erleuchtung der Finsternis

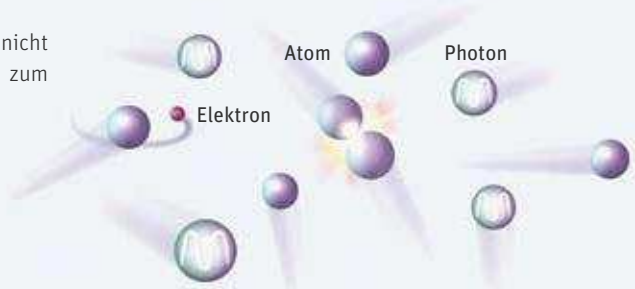
Diese Abfolge der Ereignisse mag plausibel klingen, doch bisher ist sie nicht mehr als eine Hypothese. Ohne genauere Beobachtungen können wir weder entscheiden, ob Sterne oder Schwarze Löcher die entscheidende Rolle bei der Reionisation spielten, noch, ob die Dunkle Materie tatsächlich kalt ist. Doch wie soll man das dunkle Zeitalter beobachten, wenn es doch anscheinend völlig dunkel war?

Materie kann auf verschiedene Arten Licht aussenden. Frei bewegliche Elektronen strahlen, wenn sie ihre Geschwindigkeit oder Richtung ändern. Gehen in Atomen gebundene Elektronen auf eine tiefer gelegene, energieärmere Bahn über, wird ebenfalls Strahlung frei. Doch keiner dieser beiden Prozesse spielte im dunklen Zeitalter eine bedeutende Rolle. Damals gab es nur wenige freie Elektronen, die meisten waren in Atomen gebunden – ▷

Wie man im Dunkeln sieht

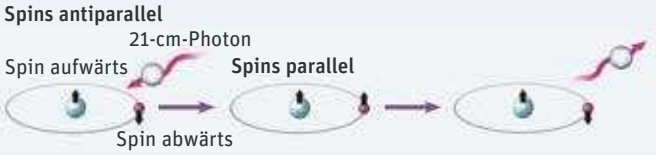
Obwohl es noch keine Sterne gab, war das dunkle Zeitalter nicht völlig finster. Ein seltener Vorgang brachte das Wasserstoffgas zum Leuchten.

Damit Wasserstoffgas strahlt, muss es von einer Energiequelle angeregt werden. Die einzigen Quellen im frühen Universum waren die bei Kollisionen frei werdende kinetische Energie der Atome sowie die Hintergrundstrahlung. Freie Elektronen sorgten für den Energieaustausch zwischen Atomen und Photonen.

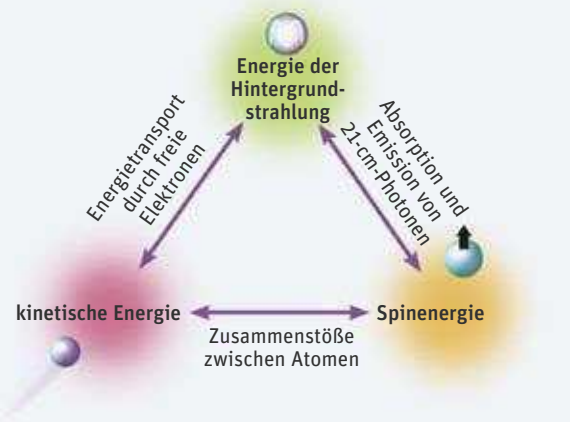


Keine dieser beiden Quellen hatte die notwendige Energie, um Wasserstoffatome zum Strahlen anzuregen, indem es das Elektron in ihrer Hülle auf ein höheres Energieniveau beförderte, sodass beim Rückfall auf den Grundzustand ein Photon frei geworden wäre.

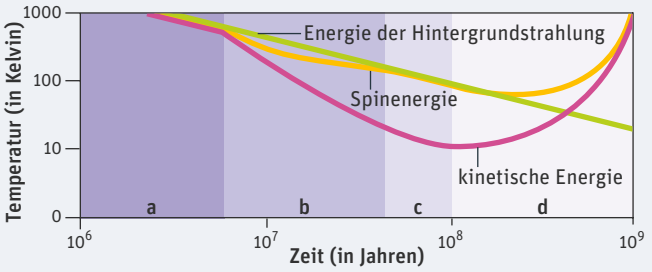
Zusammenstöße zwischen Atomen und die Photonen der Hintergrundstrahlung konnten jedoch den Spin (Eigendrehimpuls) des Elektrons so kippen, dass sich dieser parallel zu dem des Protons ausrichtete. Kippte der Spin zurück, sandte das Wasserstoffatom ein Photon mit einer Wellenlänge von 21 Zentimetern aus.



Die Energie der Photonen der Hintergrundstrahlung, die kinetische Energie der Wasserstoffatome sowie die in der Ausrichtung der Spins ihrer Protonen und Elektronen enthaltene Energie waren drei Reservoire, die Energie miteinander austauschten.



Man kann die Energiedichte in jedem der drei Reservoire als Temperatur beschreiben. Je höher die Temperatur, desto höher die Energiedichte. Zum Beginn des dunklen Zeitalters waren alle drei Temperaturen gleich (a). Dann jedoch sanken die kinetische Temperatur und die Spintemperatur schneller als die Photonentemperatur der Hintergrundstrahlung (b). Anschließend glich sich die Spintemperatur der Photonentemperatur an (c). Die Erwärmung des Gases durch Sterne und Quasare ließ die kinetische Temperatur und die Spintemperatur ansteigen (d). Das Verhältnis der verschiedenen Temperaturen bestimmt, ob und wie der Wasserstoff beobachtet werden kann.



ENERGIEKURVEN: DANIELA-NAOMI MOLNAR; ILLUSTRATIONEN: GEORGE RETSECK

▷ und befanden sich dort bereits auf den niedrigsten Bahnen, die möglich sind. Um sie auf eine höhere Bahn zu heben, von der sie wiederum hätten herabfallen können, hätte man Energie zuführen müssen, doch im frühen Universum gab es dafür keine Quelle.

Zum Glück strahlt Wasserstoffgas, das nach dem Urknall immerhin drei Viertel der baryonischen Masse des Universums ausmachte, auch ohne direkte Energiezufuhr. Möglich ist das durch den Eigendrehimpuls (Spin) subatomarer Teilchen, den man vereinfacht als ihre Drehrichtung auffassen und als Vektoren darstellen kann, die entweder aufwärts- (»up«) oder abwärtsgerichtet (»down«) sind.

Im Wasserstoffatom weisen sowohl das Proton (im Kern) als auch das Elektron (in der Hülle) einen Spin auf, und diese können parallel oder antiparallel ausgerichtet sein, wobei der letztere Zustand energieärmer ist. Sind in einem Wasserstoffatom Proton und Elektron parallel ausgerichtet, kann der Spin des Elektrons kippen und das Atom in den energieärmeren antiparallelen Zustand befördern. Die dabei freigewordene Energie sendet das Atom als Photon mit einer Wellenlänge von 21 Zentimetern aus. Umgekehrt kann ein Wasserstoffatom mit antiparallel orientiertem Protonen- und Elektronenspin ein 21-cm-Photon absorbieren, wobei der Elektronenspin in den energiereicheren parallel ausgerichteten Zustand kippt.

Ein solches 21-cm-Photon ist viel energieärmer als Photonen, die beim Übergang der Elektronen von einer Bahn auf eine andere frei werden. Deshalb konnte die Spinumkehr bereits geschehen, bevor die ersten Sterne den Kosmos erleuchteten. Die Energie der Hintergrundstrahlung sowie Stöße zwischen den Atomen genügten, um den Elektronenspin zu kippen und das Wasserstoffgas zu einem schwachen Leuchten anzuregen.

Um die Entwicklung des dunklen Zeitalters zu beschreiben, ist es ist nützlich, eine Spintemperatur zu definieren. Sie folgt aus dem Verhältnis der Anzahl ▷

Lofar und die Epoche der Reionisation

Drei Konkurrenten stehen bereit, in dem Wettrennen um die Entdeckung der Signale der kosmischen Reionisation zu starten – und Europa hat wohl den mächtigsten Boliden: Lofar, das Low-Frequency Array. Unter deutscher Beteiligung wird es derzeit in den nördlichen Niederlanden errichtet.

Wer an diesem Rennen teilnehmen will, braucht ein großes Radioteleskop, das Strahlung mit Wellenlängen von zwei bis drei Metern aufspüren kann. Nur so kann man die auf Grund der kosmischen Expansion auf die zehnfache Länge gedehnten Wellen der 21-cm-Strahlung des Wasserstoffs sehen und im Detail studieren.

Mit 77 Antennenfeldern aus jeweils 96 Niederfrequenz-Antennen und 96 Gruppen von Hochfrequenz-Antennen (die wiederum aus 16 einzelnen Meterwellen-Antennen bestehen) wird Lofar mit insgesamt 118 272 Antennen nach dem Signal der Reionisation suchen. Das amerikanisch-australische Mileura Wide-field Array soll sich aus 8000 einzelnen Antennen zusammensetzen und später in Betrieb gehen, denn erst ab 2008 beginnt dessen Konstruktion.

Dagegen stehen die ersten Antennen von Lofar bereits seit Monaten auf den Äckern der niederländischen Provinz Drenthe und haben erfolgreich die ersten Tests absolviert (siehe Bild rechts). Innerhalb der nächsten Wochen sollen die Antennen eintreffen, um auf dem Gelände des Radioobservatoriums Effelsberg in der Eifel sowie später in Potsdam, Garching, Tautenburg und Jülich die nächsten Stationen zu errichten. Weitere sollen in Frankreich, England, Dänemark und Schweden folgen.

Lofars Stärke ist nicht nur die große Antennenzahl, sondern auch seine erstaunliche Rechenkraft. Die Daten aller Antennen werden mit einer Rate von 500 Milliarden Bit pro Sekunde digital in das Herz des Teleskops geleitet, einem Superrechner namens Stella an der Universität Groningen. Als Computer vom Typ IBM Blue Gene/L ist Stella mit einer Rechenleistung von mehr als 27 Teraflop – das sind 27 Billionen Gleitkomma-Rechenoperationen pro Sekunde – einer der schnellsten Rechner Europas. Lofar braucht diese Rechenleistung, da sich die astronomischen Bilder und Spektren erst aus der Kombinationen und Korrelation zahlreicher Signale ergeben.

Wie Abraham Loeb in seinem Artikel schreibt, lassen Computersimulationen des frühen Universums vermuten, dass die Strahlung der ersten Sterne den intergalaktischen Wasserstoff in blasenförmigen Räumen ionisierte und so das neutrale Gas wie einen Schweizer Käse durchlöcherte. Je größer diese Blasen am Himmel erscheinen, desto tiefer reichen sie auch in Raum und Zeit zurück und desto größer ist demzufolge der Frequenzunterschied zwischen der von ihrer Vorder- und Rückseite ausgesandten Strahlung.

ASTRON, NETHERLANDS FOUNDATION FOR RESEARCH IN ASTRONOMY

Ausgehend von den Niederlanden werden sich die Antennen von Lofar, dem Low-Frequency Array, über weite Teile Mitteleuropas erstrecken.

Die Low-Band-Antennen (LBA) von Lofar sind mannshoch, wie Heino Falcke hier demonstriert.

MIT FREUNDL. GEN. VON HEINO FALCKE

Wir erwarten ein Signal, das einer Temperaturdifferenz von 5 bis 10 Millikelvin auf einer Winkelskala von mehreren Bogenminuten entspricht – und dem die mit 300 bis 400 Kelvin viel stärkere Strahlung der Milchstraße vorgelagert ist. Bei dieser sprichwörtlichen Suche nach der Nadel im Heuhaufen müssen wir unsere Technik so gut wie möglich auf das vermutete Signal abstimmen. Wir wollen das erreichen, in dem wir 32 der 77 Antennenfelder als »virtuellen Kernbereich« von jeweils zwei Kilometer Durchmesser anordnen. So ergibt sich die zu erwartende notwendige Winkelauflösung und Empfindlichkeit, ohne dass wir für die diffuse Radiostrahlung blind werden – was für größere Abstände zwischen den Antennen der Fall wäre. Dennoch werden wir mit Lofar vermutlich mehrere tausend Stunden beobachten müssen, um das schwache Signal der Reionisation zu erkennen.

Der Weg dorthin ist mit weiteren Schwierigkeiten gespickt. Zum einen verwischt die Ionosphäre der Erde die aufgenommenen Signale; Radiosender und Funkanlagen sind nur die stärksten der zahlreichen Störquellen zwischen uns und dem Rand des Universums. Um diesen Vordergrund herauszurechnen, benötigen wir eine genaue Himmelskarte der langwelligen Radiostrahlung mit größerer Bildschärfe – für diesen Zweck sind die bis zu mehreren hundert Kilometer entfernten Antennenfelder von Lofar nützlich. Radiosender wollen wir durch adaptive digitale Filter unterdrücken, und der Zustand der Ionosphäre muss fortwährend durch Messungen von Referenzquellen am Himmel überwacht werden.

Wenn wir in etwa zwei Jahren die meisten Antennen aufgestellt und kalibriert haben, wird unser Beobachtungsabenteuer beginnen – mit den ersten Ergebnisse rechnen wir im Jahr 2009 oder 2010.

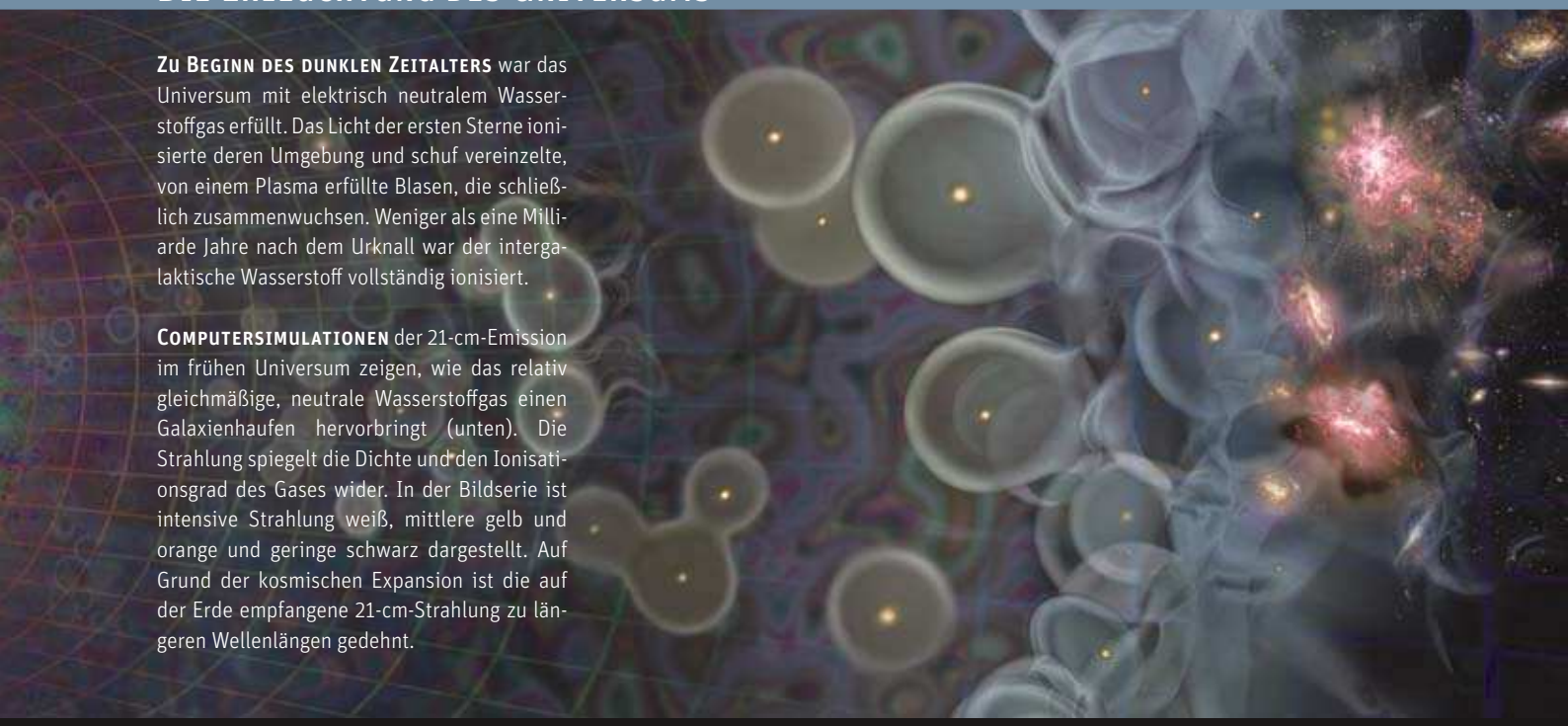
Heino Falcke

Der Autor ist internationaler Projektwissenschaftler von Lofar und außerordentlicher Professor für Hochenergie-Astrophysik an der Radboud-Universität Nijmegen.

Die Erleuchtung des Universums

Zu Beginn des dunklen Zeitalters war das Universum mit elektrisch neutralem Wasserstoffgas erfüllt. Das Licht der ersten Sterne ionisierte deren Umgebung und schuf vereinzelte, von einem Plasma erfüllte Blasen, die schließlich zusammenwuchsen. Weniger als eine Milliarde Jahre nach dem Urknall war der intergalaktische Wasserstoff vollständig ionisiert.

Computersimulationen der 21-cm-Emission im frühen Universum zeigen, wie das relativ gleichmäßige, neutrale Wasserstoffgas einen Galaxienhaufen hervorbringt (unten). Die Strahlung spiegelt die Dichte und den Ionisationsgrad des Gases wider. In der Bildserie ist intensive Strahlung weiß, mittlere gelb und orange und geringe schwarz dargestellt. Auf Grund der kosmischen Expansion ist die auf der Erde empfangene 21-cm-Strahlung zu längeren Wellenlängen gedehnt.



Zeit nach dem Urknall (in Millionen Jahren):	210	290	370	460	540
Breite des Ausschnitts (in Millionen Lichtjahren):	2,4	3,0	3,6	4,1	4,6
Wellenlänge (in Metern):	4,1	3,3	2,8	2,4	2,1
	Das gesamte Gas ist neutral.	Erste ionisierte Regionen entstehen.	Die ionisierten Blasen wachsen.	Weitere Blasen entstehen und wachsen.	Ionisierte Blasen beginnen miteinander zu verschmelzen.

▷ von Atomen mit parallel ausgerichtetem Spin zu derjenigen mit antiparallel ausgerichtetem Spin. Sind die Eigendrehimpulse der Protonen und Elektronen in den meisten Atomen gleich ausgerichtet, ist die Spintemperatur hoch. Die kinetische Temperatur ist ein Maß für die Bewegung der Gasmoleküle, und die Temperatur der Hintergrundstrahlung beschreibt die Energie ihrer Photonen.

Abhängig von den dominierenden physikalischen Prozessen unterschieden sich diese drei Temperaturen voneinander. Wir vermuten, dass die Spintemperatur im dunklen Zeitalter zunächst gleich der kinetischen Temperatur war, dann gleich der Strahlungstemperatur und schließlich wieder gleich der kinetischen Temperatur (siehe Kasten S. 50).

Kurz nach dem Urknall kühlten sich auf Grund der Expansion des Raums sowohl das Gas als auch die Strahlung ab. Für sich allein wäre das Gas schneller abgekühlt, doch bei der Bildung der Wasserstoffatome blieben freie Elektronen übrig, die dieser Tendenz entgegenwirkten und Energie aus der Hintergrundstrahlung in die Atome beförderten. Zum Beginn des dunklen Zeitalters waren deshalb alle drei Temperaturen gleich hoch.

Im Wechselbad der Energien

Da die Energiedichte der Hintergrundstrahlung weiter sank, war dieser Prozess nach etwa zehn Millionen Jahren nicht länger bedeutsam. Das Gleichgewicht zwischen Materie und Strahlung zerbrach und das Gas kühlte schneller ab. Zusammenstöße zwischen den Atomen sorgten zunächst weiter dafür, dass die kinetische und die Spintemperatur gleich blieben. Nun absorbierte das Wasserstoffgas 21-cm-Photonen und nahm Energie aus der Hintergrundstrahlung auf, jedoch nicht genug, um das Gleichgewicht wiederherzustellen.

Etwa einhundert Millionen Jahre nach dem Urknall hatte die Expansion das Gas so weit verdünnt, dass die Atome nicht mehr oft genug zusammenstießen, um die Spintemperatur mit der kinetischen Temperatur im Gleichgewicht zu halten. Dafür glichen sich nun die Spin- und die Strahlungstemperatur. Da es nun genauso viele 21-cm-Photonen absorbierte wie emittierte, war das Wasserstoffgas in jener Epoche unsichtbar. Das Aufleuchten der ersten Sterne und Schwarzen Löcher löste schließlich einen dritten Übergang aus.

Die von diesen Objekten ausgesandte Röntgenstrahlung erhöhte die kinetische

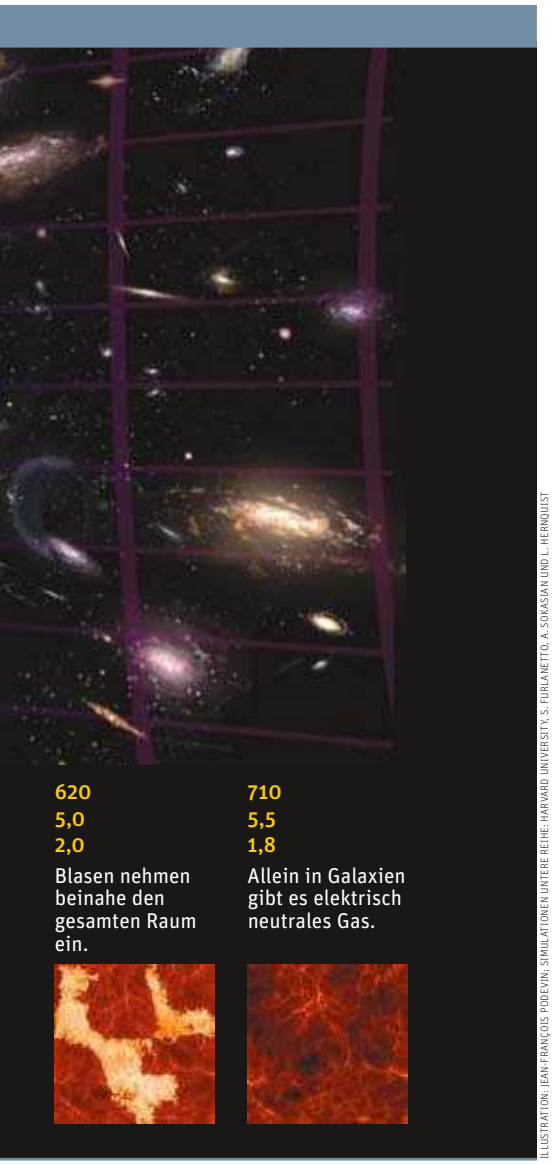


ILLUSTRATION: JEAN-FRANÇOIS PODEVIN; SIMULATIONEN UNTERE REIHE: HARVARD UNIVERSITY, S. FURLANETTO, A. SOKASIAN UND L. HERNQUIST

Energie des Gases, während ihr ultraviolettes Licht vom Wasserstoff absorbiert und wieder abgestrahlt wurde. Dies ging mit Übergängen gebundener Elektronen zwischen Bahnen mit unterschiedlicher Energie einher. Während sich die Spin- und die kinetischen Temperatur anglichen, überstiegen sie die Strahlungstemperatur – und damit begann der intergalaktische Wasserstoff, heller als die Hintergrundstrahlung zu leuchten.

Um den Elektronenspin zu kippen, ist viel weniger Energie nötig als für die Ionisation der Atome, und deshalb konnten die Galaxien das Wasserstoffgas bereits vor der Reionisation zum Leuchten bringen. Danach leuchtete der Wasserstoff durch die freien Elektronen und die 21-cm-Linie verschwand wieder.

Abhängig von Ort und Zeit ließ das wechselnde Verhältnis der drei Temperaturen den Himmel im Licht der 21-cm-Linie heller oder dunkler als die Hintergrundstrahlung erscheinen. Will man dies beobachten, muss man die Rotverschiebung der Wellenlängen auf Grund der kosmischen Expansion berücksichtigen. Seit dem Beginn des dunklen Zeitalters ist das Universum um das Tausendfache expandiert, und damals emittierte 21-cm-Photonen weisen heute eine Wellenlänge von 210 Metern auf. Ein am Ende dieser Epoche abgestrahltes Photon hätte heute eine Wellenlänge von ein bis zwei Metern.

Wettlauf der Teleskop-Riesen

Diese langen Wellen fallen in den Radiobereich des elektromagnetischen Spektrums. Im Prinzip sollte man diese Strahlung mit Niederfrequenzantennen empfangen können, die den Antennen für den irdischen Radio- und Fernsehempfang ähneln. Mehrere Forschergruppen bauen derzeit solche Anlagen. Während europäische Astronomen Lofar errichten, das Low-Frequency Array (siehe Kasten auf S. 51), und chinesische Forscher mit 21CMA, dem 21-cm-Array, schon erste Erfahrungen gemacht haben, entwickeln US-amerikanische und australische Wissenschaftler das MWA (Mileura Widefield Array). Wir wollen in diesem Jahr damit beginnen, in der Nähe der Farm Mileura im Westen Australiens die ersten Antennen zu installieren. Schließlich sollen sich 8000 Antennen auf einem Gebiet mit einem Durchmesser von 1,5 Kilometern verteilen und Strahlung mit Frequenzen zwischen 80 und 300 Megahertz empfangen, was Wellenlängen zwischen 1,0 und 3,7 Metern entspricht. Die Winkelauflösung des Instruments soll wenige Bogenminuten betragen, und so müssten wir das Ende der Reionisation mit einer Auflösung von rund drei Millionen Lichtjahren dokumentieren können.

Dass die Expansion des Universums die Wellenlänge der 21-cm-Strahlung dehnt, erlaubt uns, deren Emission zu verschiedenen Zeiten der kosmischen Geschichte zu untersuchen. Kombinieren wir Bilder, die bei verschiedenen Wellenlängen aufgenommenen wurden, so erhalten wir eine dreidimensionale Karte der Verteilung des neutralen Wasserstoffs, in der wir sehen werden, wie sich das Wasserstoffgas immer stärker verdichtete. Anfangs waren die Dichtefluktuationen mit einem tausendstel Prozent so klein wie die Fluktua- ▷

wichtige**online**adressen

Dipl.-Ing. Runald Meyer VDI
Entwicklung, Konstruktion,Technische Berechnung, Strömungsmechanik
www.etastern.de

DOK – Düsseldorfer Optik-Kontor
Kontaktlinsen online bestellen
www.dok.de

Kernmechanik – Optimiertes Modell: Kernspin + Dipolmomente
www.kernmechanik.de

Zahn-Implantate preiswert
Sparen Sie bis zu € 2000 für ein Titanimplantat plus Zirkonoxid-Krone
www.dentaprime.info

Hier können Sie den Leserinnen und Lesern von Spektrum der Wissenschaft Ihre WWW-Adresse mitteilen. Für € 83,00 pro Monat (zzgl. MwSt.) erhalten Sie einen maximal fünfzeiligen Eintrag, der zusätzlich auf der Internetseite von Spektrum der Wissenschaft erscheint. Mehr Informationen dazu von

GWP media-marketing
Mareike Grigo
Telefon 0211 61 88-579
E-Mail: m.grigo@vhb.de

▷ tionen der Hintergrundstrahlung. Dann wuchsen sie jedoch rasch um mehrere Größenordnungen an. In den Regionen mit der größten Dichte bildeten sich schließlich die ersten Galaxien und erzeugten Blasen aus ionisiertem Wasserstoff, die sich ausbreiteten und miteinander verschmolzen, bis der ganze intergalaktische Raum frei von neutralem Wasserstoff war (siehe Bild S. 52/53).

Ob Sterne oder Schwarze Löcher die Reionisation auslösten, sollten wir in unserer Karte daran erkennen, wie scharf die Blasen begrenzt sind. Massereiche Sterne strahlen vor allem ultraviolettes Licht aus, das vom intergalaktischen Wasserstoff absorbiert wird. Schwarze Löcher senden hingegen hauptsächlich Röntgenstrahlung aus, die weiter in das Gas eindringen kann. Dadurch erzeugen sie breitere Übergangszonen zwischen ionisiertem und nicht ionisiertem Wasserstoff.

Halbtransparenter Kosmos

Mehrere Gründe sprechen dafür, dass die aus Beobachtungen der 21-cm-Linie erzeugte Karte der Reionisation mehr Informationen enthalten wird als alle bisherigen kosmologischen Durchmusterungen. Erstens: Karten der Hintergrundstrahlung sind zweidimensional, da die Strahlung von einem kurzen Augenblick der kosmischen Geschichte stammt, nämlich jenem Moment, als die Temperatur des Universums unter 3000 Kelvin sank. Im Gegensatz dazu wird die 21-cm-Karte dreidimensional sein. Zweitens: Die Hintergrundstrahlung ist etwas verschmiert, weil sich ihre Freisetzung über mehrere zehntausend Jahre erstreckte, in denen das Universum weder vollständig undurchsichtig noch vollständig durchsichtig war – wie ein Nebel, der sich langsam lichtet. Streuprozesse verwischten die in die Strahlung eingeprägten, aussagekräftigen Strukturen. Die 21-cm-Strahlung bleibt hingegen ungestreut und spiegelt die Verteilung des Gases direkt wider. Und drittens: Während die Hintergrundstrahlung Informationen über die Dichteschwankungen der Materie enthält, aus denen später Galaxien entstanden, wird die 21-cm-Karte nicht nur diese Verdichtungen aufzeigen, sondern auch die Auswirkungen der jungen Galaxien auf ihre Umgebung.

Das 21-cm-Signal der Reionisation zu beobachten weckt große Hoffnungen – doch es wird nicht leicht, es auch zu finden. Zunächst ist da die niederfrequente Strahlung irdischer Radiosender, die herausgefiltert werden muss. Noch schwieriger dürfte es werden, das schwache Signal der Reionisation von der Radiostrahlung der Milchstraße zu unterscheiden, denn diese ist 10 000-mal so stark. Zum Glück hängt die Intensität des Radiorauschens der Galaxis kaum von der Wellenlänge ab, das kosmologische Signal jedoch sehr stark – dank dieser Schwankungen könnte es gelingen, das äußerst schwache Signal zu isolieren. Außerdem wollen Astronomen die 21-cm-Karte mit Bildern des James Webb Space Telescope vergleichen. Inmitten der ionisierten Blasen im neutralen Wasserstoff sollten sie die Infrarotstrahlung junger Galaxien erkennen.

Auch die Theoretiker haben noch einiges zu tun. Vor allem sollten sie Computersimulationen durchführen, die eine Region des Universums mit einem Durchmesser von mindestens einer Milliarde Lichtjahren umfassen. Nur so können wir zu statistisch gültigen Aussagen gelangen. Die Auflösung muss reichen, um nicht nur große, sondern auch Zwerggalaxien zu erfassen. Wichtig ist schließlich, die Ausbreitung der ionisierenden Strahlung in das die Galaxien umgebende Gas zu berücksichtigen.

So groß dieser Aufwand auch sein mag: Er wird sich lohnen und unser Verständnis der Galaxienentstehung weit vorantreiben. Zu den großen Rätseln gehört dabei die Erkenntnis, dass sich im Zentrum praktisch jeder Galaxie ein Schwarzes Loch verbirgt. Ab und zu strömt Gas hinein, vor allem, wenn Galaxien in gewaltigen Zusammenstößen miteinander verschmelzen. Für kurze Zeit überstrahlt das Zentrum seine Umgebung – ein so genannter Quasar ist entstanden. Astronomen wissen, dass es bereits eine Millarden Jahre nach dem Urknall Schwarze Löcher mit milliardenfacher Sonnenmasse gab, massereicher wurden sie danach kaum. Wie konnten sie so schnell anwachsen? Und warum wuchsen sie nicht weiter?

Rätselhaft ist auch die Größenverteilung der Galaxien. Wir vermuten heute, dass die von Zwerggalaxien während der Reionisation ausgesandte Ultraviolettstrahlung das intergalaktische Gas aufheizte und so die Entstehung weiterer Zwerggalaxien verhinderte. Wie entwickelte sich dieser Prozess mit der Zeit? Welche der heute beobachteten Galaxienzwerge sind die ältesten? Das sind nur einige der Fragen, deren Antworten im dunklen Zeitalter verborgen sind. ◁

Abraham Loeb ist Professor für Astronomie an der Harvard University und Gastprofessor am Weizmann Institute of Science in Israel. Er wurde 2002 mit einem Guggenheim-Stipendium ausgezeichnet.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Einführung in die extragalaktische Astronomie und Kosmologie. Von Peter Schneider. Springer-Verlag, Berlin 2006

Cosmology at low frequencies: The 21 cm transition and the high-redshift universe. Von Steven Furlanetto, Siang Peng Oh und Frank Briggs in: Physics Reports 433, S. 181, 2006

Measuring the small-scale power spectrum of cosmic density fluctuations through 21 cm tomography prior to the epoch of reionisation. Von Abraham Loeb und Matias Zaldarriaga in: Physical Review Letters, 92, Artikel 211301, 2004

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/859007.

Krebs – sind Stammzellen schuld?

Stammzellen besitzen auch eine dunkle Seite. Nach unserer Erkenntnis sind sie zumindest bei mehreren Arten von Krebs die verborgene Wurzel allen Übels. Für eine völlige Heilung müssten diese Todeszellen erkannt und ausgemerzt werden.

Von Michael F. Clarke und Michael W. Becker

Vor mehr als dreißig Jahren startete der damalige US-Präsident Richard Nixon die Initiative »Kampf gegen Krebs«. Seine Vision: durch massive Förderung der Forschung eine Heilung für die Geißel zu finden. Bisher sind einige wenige bedeutende Siege zu verbuchen, wie eine Überlebensrate von inzwischen 85 Prozent bei manchen Kinderkrebsarten, deren Diagnose einst einem Todesurteil gleichkam. Andere Krebsarten lassen sich mit neuen Medikamenten in Schach halten, sodass die Betroffenen zumindest mit ihrer Krankheit leben können.

Ein Beispiel dafür ist der Wirkstoff Imatinib (deutscher Handelsname Glivec) zur Behandlung von chronischer myeloischer Leukämie, kurz CML. Das Mittel, 2001 in den USA und in Europa zugelassen, erwies sich klinisch als Riesenerfolg: Bei vielen Patienten bildete sich dieser Blutkrebs zurück. Doch gegen eine vollständige Heilung spricht, dass ein spezielles Reservoir an bösartigen Zellen, das die eigentliche Quelle des Übels ist, dadurch nicht ausgemerzt wird.

Unter Tausenden von Tumorzellen befindet sich möglicherweise eine so genannte Krebsstammzelle, die als wahrer Motor der Erkrankung wirkt. Sie zu erkennen ist das Problem.

Nach überkommener Lehrmeinung gilt jede beliebige Krebszelle im Körper als rückfallverdächtig. Daher konzentrieren sich gängige Behandlungskonzepte darauf, unterschiedslos möglichst viele, wenn nicht alle »Verdächtigen« abzutöten. Gerade wenn es um die häufigsten Geschwulsterkrankungen mit ihren bösartigen »festen« Tumoren geht, besteht in fortgeschrittenen Stadien leider mit diesem Vorgehen nur sehr dürftige Aussicht auf Heilung. Für die CML und ein paar andere Krebsarten ist aber inzwischen erwiesen, dass nur ein Bruchteil der Tumorzellen überhaupt wieder Leukämie

In Kürze

- **Krebszellen** werden oft so beschrieben, als hätten sie alle das gleiche Potenzial, sich zu vermehren und die Krankheit zu verschlimmern. Doch bei vielen Tumortypen kann dies nur eine kleine Gruppe von Zellen.
- Die wahren tumorbildenden Zellen haben **Schlüsselmerkmale mit Stammzellen gemein**, etwa eine unbegrenzte Lebensdauer und die Fähigkeit, ein Spektrum von Zelltypen hervorzubringen. Sie gelten daher als so genannte Krebsstammzellen, wobei deren Ursprung entweder in fehlregulierten **geschädigten Stammzellen** selbst oder in deren unmittelbaren Abkömmlingen liegen dürfte.
- Um Krebs zu heilen, muss die Therapie **gezielt Tumorstammzellen bekämpfen**.

oder neues bösartiges Gewebe hervorbringen kann (siehe Kasten S. 60).

Um die Krankheit wirklich zu bezwingen, wäre daher wohl ein Ansatz weit wirksamer, der gezielt diese wenigen Schuldigen eliminiert. Weil sie die Quelle immer neuen Wachstums sind und höchstwahrscheinlich auch des Tumors selbst, erhielten sie die Bezeichnung Krebsstammzellen. Tatsächlich hält man sie aber auch ganz buchstäblich für einstige normale Stammzellen oder deren unreife Tochterzellen, die dann bösartig wurden.

Die Idee, ein Grüppchen bösartiger, maligner Stammzellen könne die wahre Krebsursache sein, ist keineswegs neu. Untersuchungen an Tumoren und an Blutkrebs in den 1950er und 1960er Jahren gelten sogar als die ersten ernsthaften Anfänge der Stammzellforschung. Denn aus den bei Krebs entgleisenden Prozessen ließen sich zugleich viele fundamentale Prinzipien ableiten, wie gesunde Gewebe entstehen und wie sie sich entwickeln.

Heute nun bringt die Stammzellforschung ihrerseits Licht in die Tumorforschung. In den vergangenen 50 Jahren haben Wissenschaftler viele Details über Mechanismen zusammengetragen, die das Verhalten normaler Stammzellen und ihrer Abkömmlinge regulieren. Und deren hierarchische Organisation (siehe Kasten S. 60) fand sich dann in ähnlicher Form auch unter bösartigen Zellen eines Tumors wieder – was stark die Hypothese stützt, dass viele Formen von Krebs ihren Ursprung in entgleisten stammzellähnlichen Zellen haben. Um genau diese als Quelle zu eliminieren, gilt es zunächst einmal, besser zu verstehen, wie eine normale Stammzelle überhaupt entarten kann.

Der menschliche Körper setzt sich aus vielen Organen und Geweben zusammen, die jeweils zum Funktionieren und Überleben des Gesamtorganismus beitragen. Die einzelnen Zellen im Gewebe sind indes oft kurzlebig. Die Haut etwa, die heute unseren Körper bedeckt, ist nicht dieselbe wie vor einem Monat. Die Zellen an ihrer Oberfläche wurden inzwischen abgestoßen und durch neue ersetzt. Auch die Auskleidung des Darms wird alle paar Wochen ausgetauscht, während die zur Blutgerinnung notwendigen Blutplättchen schon nach etwa zehn Tagen ausgedient haben.

Überall im Körper, nicht nur bei uns, sondern bei allen komplexen Lebewesen, ist im Prinzip der gleiche Mechanismus am Werk, um eine konstante Anzahl ▷

▷ funktionstüchtiger Zellen in Geweben zu erhalten. Zentrales Element sind kleine Reservoirs langlebiger Stammzellen, die bedarfsgerecht für Nachschub sorgen. Die fertigen neuen Zellen – die mit der gewünschten Funktion – entstehen in mehreren streng kontrollierten Schritten in einer organisierten Abfolge von Zellteilungen, wobei jede Generation von Abkömmlingen etwas weiter spezialisiert ist. Fachleute sprechen von Differenzierung.

Wohl am besten veranschaulichen lässt sich dieses Prinzip bei der Familie der Blut- und Immunzellen: Sämtliche Zelltypen von Blut und Lymphe haben ihren Ursprung im Knochenmark. Hier machen die so genannten hämatopoetischen – Blut bildenden – Stammzellen beim Erwachsenen weniger als 0,01 Prozent aller Zellen aus. Doch jede von ihnen generiert eine etwas größere, schon teilweise differenzierte Population von Vorläuferzellen. Diese teilen sich erneut und spezialisieren sich über weitere Zwischenstadien schließlich zu reifen Zellen, die jeweils eine bestimmte Aufgabe aus dem breiten Gesamtspektrum erfüllen. Dieses reicht vom Schutz vor Infektionen bis zum Transport von Sauerstoff in die Gewebe (siehe Kasten rechts). Hat eine Zelle ihr endgültiges funktionelles Stadium erreicht, kann sie sich weder weiter teilen noch andere Aufgaben übernehmen. Sie gilt jetzt als ausdifferenziert.

Wie aber bleiben undifferenzierte Stammzellen weiterhin verfügbar? Sie verdanken dies ihrer einzigartigen Fähigkeit, sich selbst zu erneuern: Teilt sich eine Stammzelle in zwei Tochterzellen, so besteht die Möglichkeit, dass nur eine von ihnen den Pfad der Spezialisierung einschlägt, während die andere ihre Identität als Stammzelle beibehält und undifferenziert im Reservoir verharrt. Somit kann die Gesamtzahl Stammzellen konstant gehalten werden, während auf den Zwischenstufen die der Vorläuferzellen zu wachsen vermag. Dieses System ermöglicht ein schnelles Reagieren, wenn sich der Bedarf an Zellen eines bestimmten Typs verändert.

Das wichtigste definitorische Merkmal von Stammzellen ist eben diese Fähigkeit zur Selbsterneuerung. Denn sie allein verleiht ihnen unbegrenzte »Lebensdauer« und erhält ihr Vermehrungspotenzial. Vorläuferzellen indes können sich zwar in gewissem Maß auch selbst erneuern, ihre maximale Anzahl an Zellteilungen wird aber durch einen internen Zählmechanismus begrenzt. Mit jedem Differenzierungsschritt der Abkömmlinge sinkt die Fähigkeit, sich zu vermehren.

Die praktische Bedeutung dieser Unterschiede offenbart sich bei Transplantationsexperimenten. Wird das natürliche hämatopoetische System von Mäusen durch Bestrahlung des Knochenmarks zerstört, so können sich dorthin eingebrachte Vorläuferzellen zwar vermehren und die Blutbildung vorübergehend wieder in Gang bringen, doch binnen vier bis acht Wochen sind alle Zellen abgestorben. Eine einzige transplantierte hämatopoetische Stammzelle hingegen kann das gesamte Blutsystem des Tiers auf Lebenszeit wiederherstellen.

Wäre es nicht sinnvoller, wenn sich einfach jede Zelle nach Bedarf vermehren könnte?

Gemeinsame Signalkaskaden

Die hierarchische Organisation des Blut bildenden Systems ist schon seit über 30 Jahren wohl bekannt. In neuerer Zeit wurden dann ähnliche zelluläre Hierarchien beim Menschen auch im Gewebe von Gehirn, Brust, Prostata, Haut, Dünn- und Dickdarm entdeckt. An all diesen Stellen wird das Verhalten von Stammzellen nach gleichartigen Prinzipien reguliert. Das gilt beispielsweise für die Art und Weise, wie ihre Anzahl kontrolliert, und ebenso, wie das künftige Schicksal – der jeweils einzuschlagende Entwicklungsweg – einzelner Zellen festgelegt wird. Bei Letzterem spielen Gene wie *Bmi-1, Notch, Sonic hedgehog und Wnt* (genauer: die durch deren Aktivitäten ausgelösten Signalkaskaden) eine Schlüsselrolle. Entdeckt wurden die meisten dieser Gene nicht etwa von Stammzell-, sondern von Krebsforschern: Die gleichen Sinalwege sind auch an der Entstehung bösartiger Zellen beteiligt.

Viele solcher Ähnlichkeiten zwischen Stamm- und Krebszellen wurden inzwischen erkannt. Hier einige Beispiele. Nach klassischer Grunddefinition sind Tumorzellen bösartig, wenn sie, wie bei Krebs offenkundig, sich unbegrenzt teilen und überleben, in Nachbargewebe eindringen und an entfernten Stellen des Körpers Metastasen bilden können. Bei ihnen scheinen die üblichen Schranken, welche Identität und Vermehrung von Zellen streng kontrollieren, durchbrochen. Normale Stammzellen unterliegen bereits durch die enorme Fähigkeit zur Selbsterneuerung (ihre Unsterblichkeit quasi) nicht den meist üblichen Regeln, was Lebensdauer und Vermehrung anbe-

Produktionshierarchie

Das Grundprinzip, nach dem Stammzellen auch anderswo im Körper arbeiten, lässt sich am Beispiel des Blut bildenden, des hämatopoetischen Systems veranschaulichen. Die hämatopoetischen Stammzellen, aus denen dann verschiedene Blut- und Immunzellen hervorgehen, sitzen im Knochenmark. Umgeben sind sie von so genannten Stromazellen, von denen sie wichtige regulatorische Signale erhalten. Diese bilden gewissermaßen eine Umweltnische. Werden neue spezialisierte Blutkörperchen benötigt, teilt sich eine Stammzelle zunächst in zwei Tochterzellen: Eine verbleibt in ihrer Nische und behält ihre Identität als Stammzelle bei, die andere, eine so genannte multipotente Vorläuferzelle, ist kurzlebig.

Letztere teilt sich in zwei Vorläuferzellen, aus denen entweder nur noch rote und bestimmte weiße Blutkörperchen hervorgehen können (myeloide Linie) oder nur Lymphocyten (lymphoide Linie), die eine eigene Gruppe weißer Blutkörperchen darstellen. Mit jedem Entwicklungsschritt – mit zunehmender Spezialisierung, die fachlich als Differenzierung bezeichnet wird – verlieren die Zellen programmgemäß an Teilungsfähigkeit. Am Ende, im ausdifferenzierten Zustand, ist sie null. Nur eine Stammzelle behält ihr volles Teilungspotenzial – durch ihre Fähigkeit, sich unbegrenzt selbst zu erneuern, ohne sich dabei zu differenzieren.

langt. Zudem können sie letztlich ein ganzes Sortiment von Zelltypen hervorbringen, und dadurch all die verschiedenen Bestandteile eines Organs, Systems oder Gewebes. Ein bösartiger Tumor ist gleichfalls durch eine Mischung verschiedener Zellen charakterisiert, allerdings eine ziemlich chaotische – so als wäre er eine höchst ungeordnete Variante eines Organs. Mehr noch: Hämatopoetische Stammzellen wandern auf Verletzungssignale hin auch zu entfernten Körperbereichen – ganz ähnlich wie metastasierende Tumorzellen.

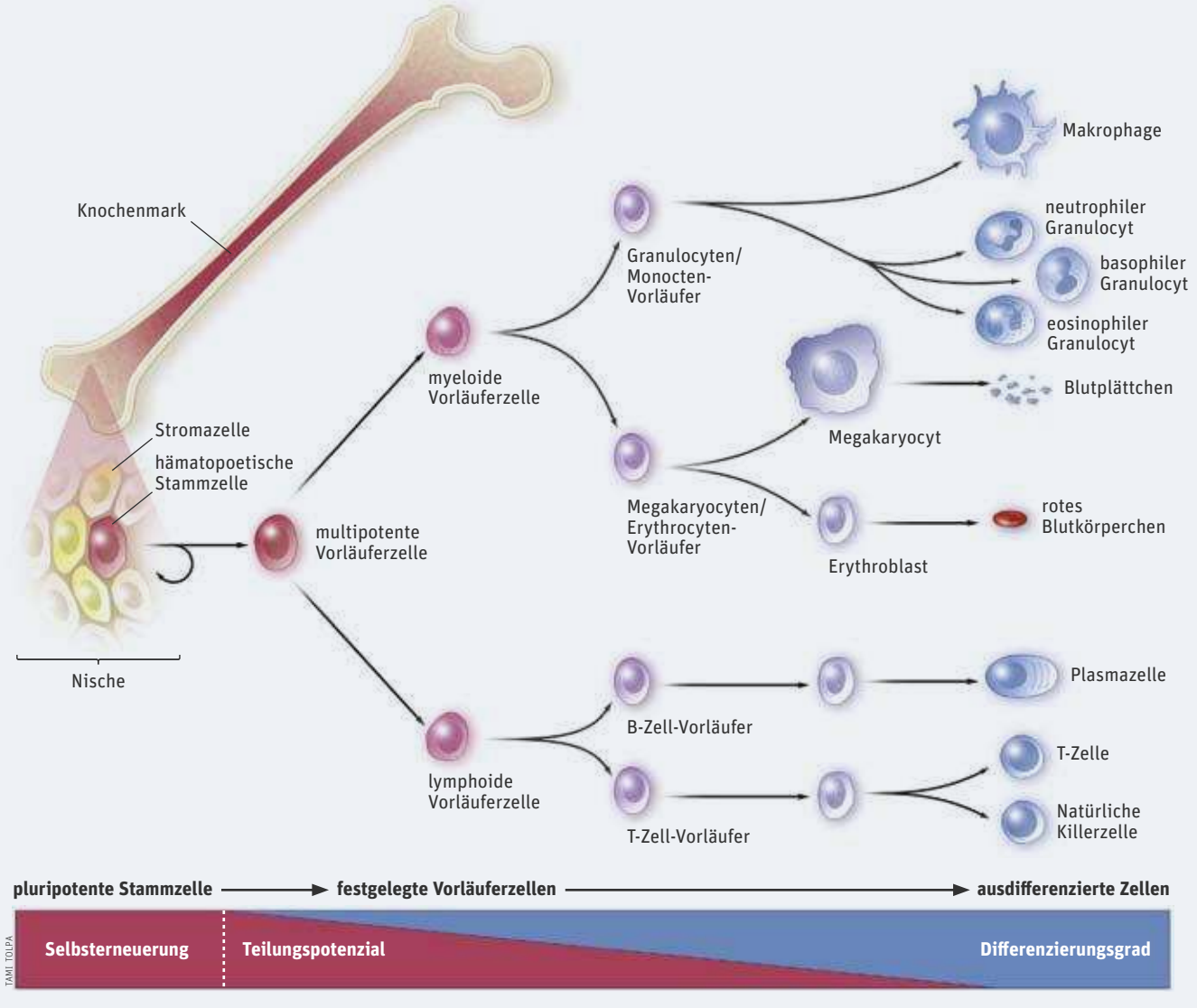
Bei gesunden Stammzellen unterliegt das Potenzial zu unbegrenztem Wachstum und vielfältiger Diversifizierung einer strengen genetischen Kontrolle. Ohne diese käme etwas heraus, das etwas Bösartigem sehr ähnelt. Solche Parallelen deuten zusammen mit immer mehr experimentellen Befunden darauf hin, dass ein Versagen der Stammzell-Regulation vielen Formen von Krebs zu Grunde liegt: dessen Entstehung und Erhalt, vielleicht auch dessen Ausbreitung im Körper.

Sammelbecken für Mutationen

Wozu aber der ganze Aufwand mit Stammzellen? Vor allem für Gewebe mit einem hohen Verschleiß, wie etwa Darmschleimhaut oder Haut, erscheint ein solches System zu kompliziert und ineffizient, um alte oder beschädigte Zellen zu ersetzen. Wäre es nicht sinnvoller für den Organismus, wenn sich jede seiner Zellen einfach nach Bedarf vermehren könnte, um geschädigte Nachbarn zu ersetzen? Oberflächlich betrachtet mag dieser Einwand stimmen – doch damit würde jede Zelle auch zu einer potenziellen Tumorzelle.

Nach allgemeiner Vorstellung entsteht Krebs dann, wenn sich in Schlüsselgenen einer Zelle so genannte onkogene Veränderungen anhäufen, sie zum unkontrollierten Wachstum anregen und in eine Tumorzelle verwandeln. Genmutationen ereignen sich im typischen Fall, wenn etwa Strahlung oder Chemikalien das Erbgut direkt schädigen oder wenn es vor einer Zellteilung fehlerhaft kopiert wird. Weil in Organen, wo Krebs am häufigsten auftritt, die Stammzellen als einzige Zellen langlebig, zugleich aber rar sind, stellen sie mengenmäßig ein sehr viel kleineres potenzielles Reservoir ▷

DER BLUTKÖRPERCHEN

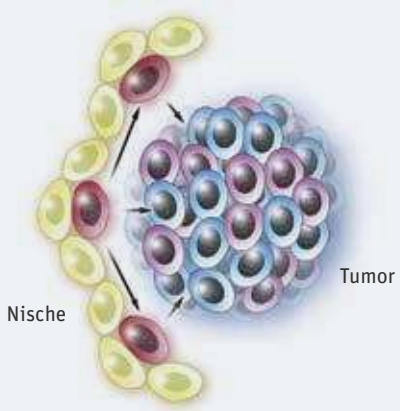


Mögliche Wege zu Krebs

Bösartige Stammzellen wurden bei mehreren Formen von Blutkrebs und soliden, festen Tumoren nachgewiesen. Wie sie im Einzelnen bösartig werden, ist noch nicht geklärt. Mehrere Wege sind denkbar. Wie jede Stammzelle kann sich auch eine Krebsstammzelle unbegrenzt selbst erneuern (indem sie jeweils eine undifferenziert bleibende Tochterzelle erzeugt), zugleich wird sie aber zum Quell einer theoretisch unbegrenzten Zahl jener abnorm differenzierten Zellen, welche den Großteil eines Tumors ausmachen. Diese sind allerdings von begrenzter Lebensdauer und selbst nicht tumorigen – das heißt, sie können den Tumor nicht neu bilden.

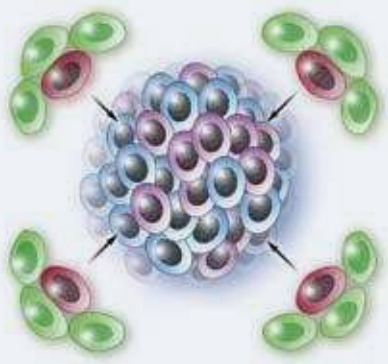
Das Verhalten normaler Stammzellen wird von ihrem eigenen genetischen Programm im Zusammenspiel mit Nischensignalen streng kontrolliert. Veränderungen in der Art und Weise, wie Stammzellen mit so genannten onkogenen Mutationen auf diese Signale reagieren, spielen möglicherweise eine entscheidende Rolle beim endgültigen Übergang zur Bösartigkeit (a, b und c). Alternativ könnten Vorläuferzellen Mutationen von Stammzellen vererbt bekommen und dann so weitermutieren, dass sie die volle Fähigkeit zur Selbsterneuerung zurückgewinnen, die sonst den Stammzellen vorbehalten ist (d). Für jeden Weg gibt es Hinweise jeweils bei bestimmten Formen von Krebs.

a



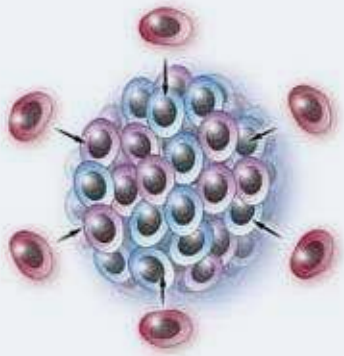
Erweiterte Nische: Krebsstammzellen mit onkogenen Mutationen werden durch normale Nischensignale so lange in Schach gehalten, bis weitere Veränderungen in ihnen selbst oder in ihrer Nische dazu führen, dass Letztere sich ausdehnt. Die bösartigen Stammzellen können nun ihre eigene Anzahl aufstocken und damit auch mehr der abnormen Abkömmlinge erzeugen.

b



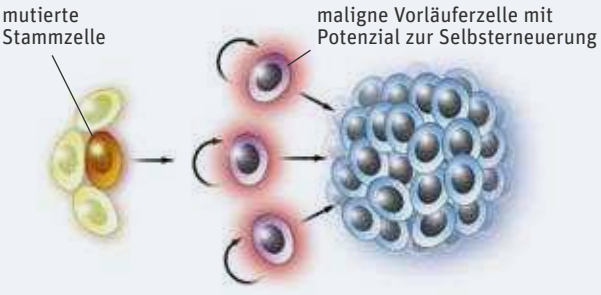
Ersatznische: Wenn unter den onkogenen Mutationen welche sind, die Krebsstammzellen eine Anpassung an eine neue Nische erlauben, dann können die Zellen ihre Zahl aufstocken und proliferieren, möglicherweise auch in Nachbargewebe eindringen oder Metastasen in entfernten Körperbereichen bilden.

c



Nischenunabhängigkeit: Mutationen können eine zur malignen Entartung prädestinierte Stammzelle unabhängig von Nischensignalen machen. Dadurch entfallen sämtliche Kontrollmechanismen aus der Umgebung auf Selbsterneuerung und Zellteilung.

d



Mutation zur Selbsterneuerung: Vorläuferzellen mit onkogenen Mutationen, die sie von ihrer Mutterstammzelle geerbt haben und die zur Bösartigkeit prädestinieren, erlangen durch weitere Mutationen die Fähigkeit zur Selbsterneuerung zurück. Ihre nun unbegrenzte Lebensspanne und tumorigenen Eigenschaften lassen sie zu Krebsstammzellen werden.

TAMI TOLPA

▷ für kumulative genetische Schäden dar. Doch wegen ihrer Langlebigkeit werden sie leider am ehesten zum Sammelbecken für Mutationen, die schließlich zu Krebs führen könnten. Dies würde auch erklären, warum er oftmals erst Jahrzehnte nach einer Strahlenexposition des Gewebes auftritt. Die anfängliche genetische Schädigung mag nur die erste einer ganzen Reihe weiterer onkogener Mutationen sein, die insgesamt nötig sind, damit sich eine gesunde Zelle schließlich in eine bösartige verwandelt. Allerdings kommt als wegbereitender Faktor noch das bereits vorhandene enorme Teilungspotenzial von Stammzellen hinzu. Sie würden weniger zusätzliche Mutationen zum Tumorwachstum benötigen als andere Zellen.

Spinnt man diese Überlegungen weiter fort, so sind verschiedene Wege zur Bösartigkeit möglich. Nach einem Modell führen Mutationen in Stammzellen zu einem Kontrollverlust über die Selbsterneuerung, woraus eine Gruppe von Stammzellen mit einer Prädisposition zur Bösartigkeit resultiert. Weitere onkogene Ereignisse, die zum Tumorwachstum führen, treten entweder in den Stammzellen selbst auf oder in ihren Abkömmlingen, die auf eine Entwicklungsschiene gesetzt wurden, also in Vorläufern der reifen Zellen. Nach einem anderen Modell finden onkogene Mutationen zunächst in den Stammzellen statt, die letzten Schritte der Transformation (der Umwandlung in Krebszellen) indes nur in Vorläuferzellen, wobei deren verlorenes Selbsterneuerungspotenzial irgendwie reaktiviert werden müsste.

Stützende Belege für beide Modelle gibt es bei verschiedenen Krebsarten. Und zumindest im Fall der chronischen myeloischen Leukämie spielen beide Prozesse jeweils in verschiedenen Stadien eine Rolle. Dieser Blutkrebs – er betrifft weiße Blutkörperchen, also Leukocyten – ist eine Folge einer Fusion von zwei Genen. Baut man die Fehlkonstruktion in eine gesunde hämatopoetische Stammzelle ein, verwandelt sich diese in eine Leukämiestammzelle. Unbehandelt mündet das chronische Stadium unaufhaltsam in die akute Phase, die so genannte Blastenkrise. Bei Patienten konnten Catriona Jamieson und Irving Weissman an der Universität Stanford (Kalifornien) zusätzliche genetische Veränderungen identifizieren, die spezifisch für die gefährliche Blastenkrise verantwortlich waren: Sie befähigten bestimmte Vorläuferzellen zur Selbsterneuerung.

Die Hinweise der letzten zehn Jahre, wonach einerseits Stammzellen bösartig werden könnten und dass andererseits nur gewisse Krebszellen eine Reihe Eigenschaften mit Stammzellen teilen, bestärkten die Idee, eine Teilpopulation bestimmter stammzellähnlicher Krebszellen sei die treibende Kraft für das Tumorwachstum. Diese Hypothese hat eine längere Vorgeschichte, doch früher fehlten die technischen Möglichkeiten, sie zu beweisen.

Modellfall Blutkrebs

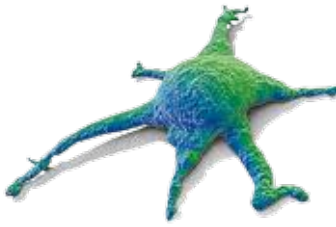
Bereits in den 1960er Jahren erkannten einzelne Wissenschaftler, dass es in ein und demselben Tumor Zellen gab, die unterschiedlich gut neues krankhaftes Gewebe zu bilden vermochten. Wie C. H. Park und seine Kollegen an der Universität Toronto (Kanada) dann 1971 zeigten, wuchsen frisch aus einem Myelom entnommene Zellen in Kultur alles andere als gleich gut. (Ein Myelom ist ein Tumor von Antikörper produzierenden Plasmazellen im Knochenmark.) Eine eindeutige Erklärung dafür war damals nicht möglich, denn für das beobachtete Phänomen gab es mindestens zwei: Entweder hätten alle Zellen sich in Kultur vermehren können, doch zufällig taten es nur einige; oder aber es existierte tatsächlich eine Hierarchie. In diesem Fall wären aus Krebsstammzellen auch Zellen hervorgegangen, die nicht »tumorigen« waren, das heißt keinen neuen Tumor zu bilden vermochten.

Bereits vier Jahre zuvor hatte Philip J. Fialkow von der Universität von Washington in Seattle gezeigt, dass das Stammzellmodell zumindest auf Leukämie, einen Blutkrebs, wahrscheinlich zutraf. Als Erkennungszeichen für die Abstammungslinie einer Zelle diente ihm das markierbare Membranprotein G-6-PD; damit vermochte er nachzuweisen, dass bei einigen Leukämiepatientinnen sowohl tumorbildende Zellen als auch bereits teildifferenzierte, nicht tumorbildende Abkömmlinge auf eine gemeinsame Mutterzelle zurückgingen.

Diese frühen Studien waren zwar bedeutsam für die Entwicklung des Stammzellmodells von Krebs, litten aber an dem Manko, dass Forscher damals noch außer Stande waren, aus einem Tumor verschiedene Zellpopulationen zu isolieren und zu charakterisieren. Ein Durchbruch für die Stammzellbiologie kam mit der kommerziellen Verfügbarkeit von Flusscytometern in den 1970er Jahren. Mit diesen Geräten lassen sich verschiedene lebende Zellen automatisch nach bestimmten Oberflächenproteinen sortieren.

Ein weiterer Durchbruch gelang zwei Jahrzehnte später mit Testsystemen zum eindeutigen Nachweis der Selbsterneuerung bei Zellen. Für den Menschen gibt es sie erst, seit Weissmann und John Dick von der Universität Toronto Methoden entwickelten, um normale menschliche Stammzellen in Mäusen wachsen zu lassen. Gestützt auf sein Tiermodell und die Flusscytometrie veröffentlichte Dick ab 1994 eine Reihe bahnbrechender Arbeiten, in denen er Tumorstammzellen bei Leukämie nachwies. Und 2003 gelang Richard Jones von der Johns-Hopkins-Universität in Baltimore (Maryland) das Gleiche für das multiple Myelom.

Tatsächlich konnte nur eine Untergruppe von Krebszellen in neuer Umgebung den Originaltumor regelrecht wiedererschaffen



Einige Monate zuvor hatte unsere Arbeitsgruppe an der Universität von Michigan in Ann Arbor den ersten Beleg für Krebsstammzellen bei soliden, festen Tumoren veröffentlicht. Bei unseren Experimenten transplantierten wir sortierte Zellen aus menschlichen Brusttumoren in Mäuse. Tatsächlich konnte nur eine Untergruppe von Zellen in ihrer neuen Umgebung den Originaltumor quasi wiedererschaffen: Diese neuen Geschwulste zeigten jeweils die gleichen physischen Merkmale, das gleiche »phänotypische Profil« wie die jeweiligen Krebsgewebeproben der Patientinnen. Die tumorbildende Gruppe transplantierter Zellen war offensichtlich in der ▷

▷ Lage, sowohl sich selbst zu erneuern als auch all die verschiedenen Zellpopulationen des Originaltumors hervorzubringen, einschließlich der nichttumorbildenden Zellen darin. Damit war bestätigt, dass in einem Mammakarzinom eine ähnliche Zellhierarchie existiert wie bei den bösartigen Veränderungen im Blut bildenden System.

Seither explodiert die biologische Erforschung von Krebsstammzellen förmlich. Labore überall auf der Welt entdecken ähnliche Teilpopulationen tumorbildender Zellen bei einer wachsenden Anzahl anderer Krebsformen. So identifizierte 2004 das Team von Peter Dirks an der Universität Toronto in Primärtumoren des menschlichen Zentralnervensystems Zellen, die in Mäusen den kompletten Tumor zu regenerieren vermochten. Relativ zahlreich fanden sich solche mutmaßlichen Krebsstammzellen beim Medulloblastom, einem der am schnellsten wachsenden Typen menschlicher Hirntumoren; weit weniger waren es bei nicht so aggressiven Arten.

Eine Substanz aus Mutterkraut treibt Stammzellen der akuten myeloischen Leukämie in den Selbstmord

Signale im Kulturmedium

Das Modell der Krebsstammzellen bekommt Rückenwind von einem verwandten, in neuerer Zeit sehr aktiven Forschungsgebiet. Denn offenbar hat die Umgebung eines Tumors – die so genannte Nische, in die er eingebettet ist und von der er Signale erhält – großen Einfluss auf dessen Entstehung und Erhalt. Aus Untersuchungen an verschiedenen normalen Körperzellen, darunter auch Stammzellen, weiß man inzwischen, wie wichtig Signale aus dem umliegenden Gewebe und der unterstützenden extrazellulären Matrix sind, damit eine Zelle ihre Identität bewahrt und sich wie gewünscht verhält. Werden gewöhnliche Körperzellen aus ihrem Umfeld gerissen und in Kultur gebracht, neigen sie zum Beispiel dazu, sich teilweise zu entdifferenzieren. Stammzellen hingegen würden sich rasch vermehren und gerade differenzieren – so als wäre dies ihr normales Programm, und allein Signale aus ihrer natürlichen Nische hielten sie im Zaum. Die Kunst ihrer Züchtung besteht tatsächlich darin, im Kulturmedium geeignete Signale bereitzustellen.

Natürliche Stammzellnischen sind kleine Enklaven im Körper, umgeben von spezifischen anderen Zelltypen – etwa den Stromazellen im Knochenmark, die hier das Bindegewebe bilden. Mit wenigen Ausnahmen bleiben Stammzellen immer in ihrer Nische, manchmal sind sie sogar über spezielle Haftmoleküle daran angeleint. Vorläuferzellen hingegen verlassen die Nische, während sie sich weiter differenzieren, zuweilen eskortiert von Aufpassern.

Die Signalgebung ist wichtig, damit Stammzellen im undifferenzierten Zustand bleiben und ruhen, bis der Aufruf zu neuer Zellproduktion erfolgt. Könnten nicht Signale aus der örtlichen Umgebung eine ähnliche Kontrolle auf Tumorstammzellen ausüben? Interessante Ergebnisse lieferten beispielsweise Transplantationsexperimente mit Stammzellen, die durch onkogene Mutationen bereits für eine maligne Entartung prädestiniert waren. In einer neuen gesunden Nische brachten sie keinen Tumor hervor. Wurden im Gegenzug gesunde Stammzellen in ein durch Strahlen vorgeschädigtes Gewebe verpflanzt, so gingen aus ihnen Tumoren hervor.

Viele der Gene und Prozesskaskaden, die sich als wichtig für die Signalgebung zwischen Stammzellen und ihrer Nische erwiesen haben, sind im Zusammenhang mit Krebs bekannt. Auch das weist darauf hin, dass die Nische eine Rolle für die letzten Schritte zur malignen Entartung spielt. Denkbar sind drei Szenarien (siehe Kasten S. 60):

▶ Die Nische hält bösartige Stammzellen zunächst in Schach, wird aber durch irgendetwas verändert und vergrößert sich. So bekommen die Zellen mehr Raum zum Wachsen und ihre Zahl steigt.

▶ Gewisse onkogene Mutationen erlauben es den Krebsstammzellen, sich anderen Nischen anzupassen. Auch so würden sie ihre Anzahl erhöhen und ihr Territorium ausweiten.

▶ Gewisse Mutationen machen Krebsstammzellen völlig unabhängig von Nischensignalen, sodass sie sich fortan ohne die Kontrolle ihrer Umgebung selbst erneuern und teilen.

Die Auswirkungen eines Stammzellmodells auf das Verständnis und die Behandlung von Krebs sind tief greifend. Heutige Therapien richten sich gegen alle Zellen eines Tumors, obwohl nach unseren und anderen Studien nur ein Bruchteil darin über das Potenzial verfügt, bösartige Geschwulste zu regenerieren und ihr Wachstum zu unterhalten. Wenn das traditionelle Vorgehen den Tumor zwar schrumpfen lässt, aber diese Zellen verfehlt, wird er wahrscheinlich wiederkehren. Behandlungsverfahren, die gezielt gegen Tumorstammzellen gerichtet sind, könnten hingegen den eigentlichen Motor der Krankheit zerstören. Die übrigen nichttumorbildenden Zellen würden nach einiger Zeit von selbst absterben.

In der medizinischen Praxis existieren bereits Indizien, die einen solchen Ansatz stützen. Nach einer Chemotherapie von Hodenkrebs beispielsweise wird geprüft, wie gut der Tumor darauf angesprochen hat. Enthält die Gewebeprobe nur reife Zellen, droht gewöhnlich kein Rückfall. Eine weitere Therapie ist dann unnötig. Umgekehrt verhält es sich bei einer großen Anzahl unreifer Zellen. Ob es sich bei diesen nicht völlig ausdifferenzierten Zellen um junge Abkömmlinge handelt, welche die Anwesenheit von Krebsstammzellen anzeigen, bleibt noch zu belegen, der Zusammenhang mit der Prognose deutet jedoch stark darauf hin.

Am Erscheinungsbild allein lassen sich Stammzellen jedoch nicht erkennen. Daher bedarf es erst einmal besserer Verfahren, um die seltenen Krebsstammzellen herausfischen, analysieren und ihre einzigartigen Eigenschaften besser verstehen zu können. Sobald die Unterscheidungsmerkmale bekannt sind, sollten sich maßgeschneiderten Therapien gegen diese Zellen entwickeln lassen. Gelänge es Forschern etwa, Mutationen oder Signale aufzuspüren, die für die Selbsterneuerung eines bestimmten Stammzelltyps verantwortlich sind, so wären das nahe liegende Angriffspunkte, um die tumorbildenden Zellen auszuschalten.

Belege für Krebsstammzellen

Entscheidend für den Nachweis von Krebsstammzellen waren Verfahren, mit denen lebende Krebszellen aus einem Patienten nach bestimmten Merkmalen sortiert und dann auf ihr Selbsterneuerungspotenzial geprüft werden konnten. Aufgelistet sind hier Krebsformen, bei denen bösartige Stammzellen mit den beiden kritischen Fähigkeiten nachgewiesen wurden, sich selbst zu erneuern und das gesamte Zelltypspektrum des Ausgangstumors wieder herzustellen. Solche Eigenschaften bedeuten: Wenige Krebsstammzellen könnten den gesamten ursprünglichen Tumor begründet haben und fortwährend Nachschub für seine viel größere Zellpopulation liefern (deren Mitglieder großenteils nicht tumorigen, nicht tumorbildend sind) – und die alte Krankheit nach einer Therapie wieder aufflammen lassen, solange Stammzellen dem Angriff entgehen.

Erkrankungen, bei denen Krebsstammzellen nachgewiesen wurden:

- akute myeloische Leukämie (1994)
- akute lymphoblastische Leukämie (1997)
- chronische myeloische Leukämie (1999)
- Brusttumoren (2003)
- multiples Myelom (2003)
- Hirntumoren (2004)
- Prostatatumoren (2005)

Ein ermutigendes Beispiel für die Machbarkeit dieser Strategie lieferten Craig T. Jordan und Monica L. Guzman von der Universität Rochester. 2002 identifizierten sie molekulare Merkmale maligner Stammzellen, die als ursächlich für die akute myeloische Leukämie (AML) angesehen werden. Bestimmte Wirkstoffe konnten hier bevorzugt angreifen. Im Jahr 2005 berichteten die beiden Forscher, dass eine Substanz aus dem Mutterkraut diese AML-Stammzellen in den Selbstmord treibt, während gesunde Stammzellen nicht in Mitleidenschaft gezogen werden.

Einige Wissenschaftler wollen Immunzellen dazu bringen, Krebsstammzellen aufzuspüren und auszuschalten. Andere wiederum untersuchen, ob bereits verfügbare Wirkstoffe Nischensignale modifizieren. Auf diese Weise wollen sie die entarteten Zellen darin der Signale berauben, die sie gedeihen lassen. Möglicherweise können eigens zu entwickelnde Wirkstoffe Krebsstammzellen auch zwingen, sich zu differenzieren. Damit sollte ihnen die Fähigkeit zur Selbsterneuerung genommen sein.

Was indes am wichtigsten ist: Wir Krebsforscher sind den Verdächtigen auf der Spur. Mit einer Kombination aus verschiedenen Ansätzen hoffen wir, die wahren Schuldigen an dieser Krankheit bald zu überführen und unschädlich zu machen. ◁

Michael F. Clarke (Foto) leitete zunächst ein Labor an der Universität von Michigan in Ann Arbor. **Michael W. Becker** arbeitete mit ihm zusammen, als dort 2003 erstmals bei Brustkrebs Tumorstammzellen isoliert wurden. Clarke ist inzwischen Professor für Krebsbiologie und -medizin am kalifornischen Stanford-Institut für Stammzellbiologie und regenerative Medizin. Becker ist Dozent für Medizin an der hämatologischen und onkologischen Abteilung des Medizinischen Zentrums der Universität Rochester (Bundesstaat New York).

Autor und Literaturhinweise

Stem cells and cancer: two faces of eve. Von Michael F. Clarke and Margaret Fuller in: Cell, Vol. 124, S. 1111, 24. März 2006

Leukaemia stem cells and the evolution of cancer-stem-cell research. Von Brian J. P. Huntly and D. Gary Gilliland in: Nature Reviews Cancer, Vol. 5, Nr. 4, S. 311, April 2005

Context, tissue plasticity, and cancer: Are tumor stem cells also regulated by the microenvironment? Von Mina J. Bissell and Mark A. LaBarge in: Cancer Cell, Vol. 7, S. 17, Januar 2005

The proteus effect: stem cells and their promise for medicine. Von Ann B. Parson. Joseph Henry Press, 2004

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de/artikel/858947

Wissen aus erster Hand

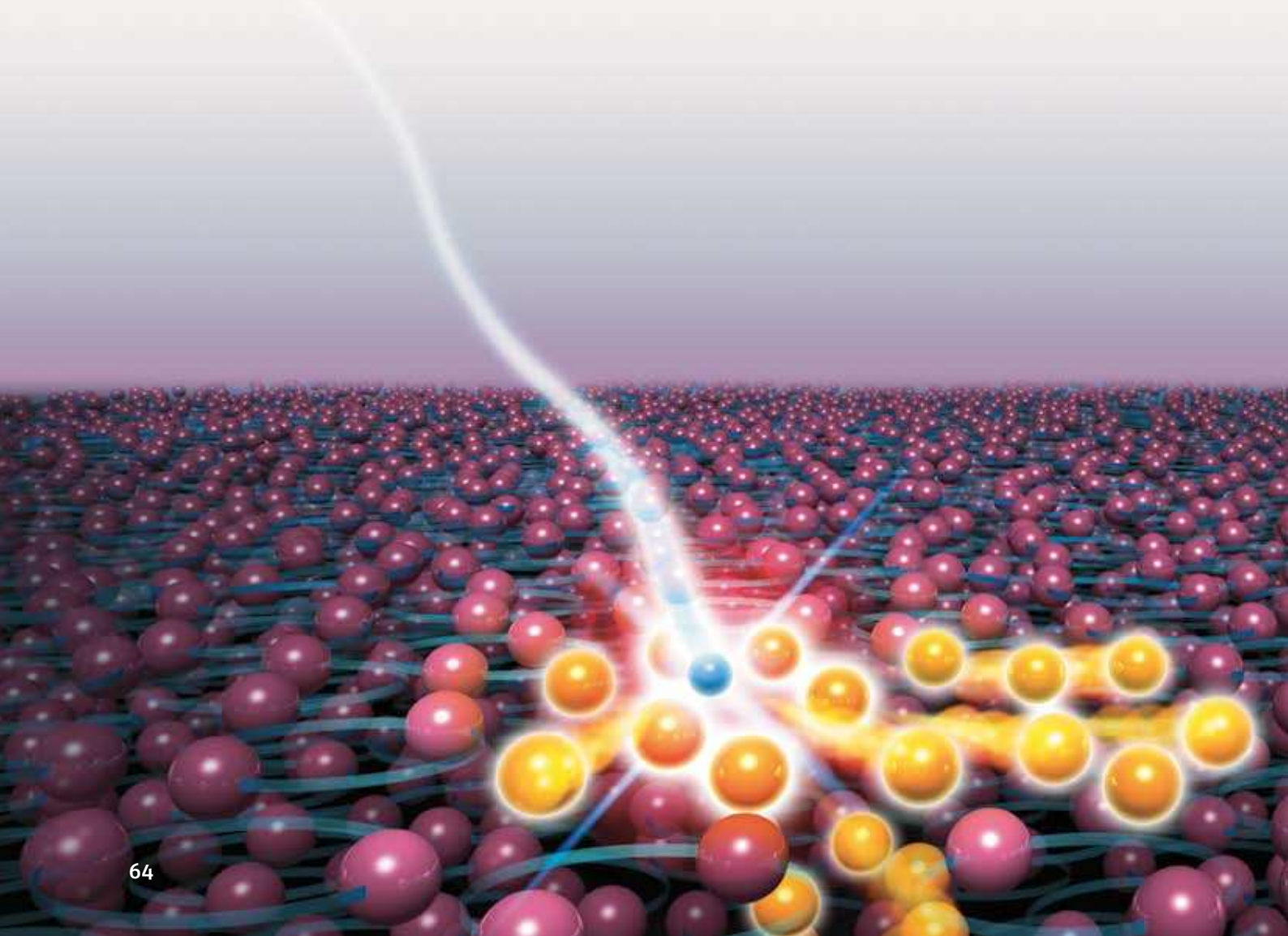
spektrumdirekt
Die Wissenschaftszeitung im Internet

Die Redaktion von spektrumdirekt informiert Sie online schnell, fundiert und verständlich über den Stand der Forschung.

www.spektrumdirekt.de/info

Sehen mit Supraleitern

Detektoren aus supraleitendem Material reagieren schon auf einzelne Lichtquanten. Für derart hyperempfindliche Fotosensoren gibt es vielfältige Anwendungen in Astronomie, Teilchenphysik und sogar zum Aufspüren radioaktiver Schmuggelware.



Von Kent D. Irwin

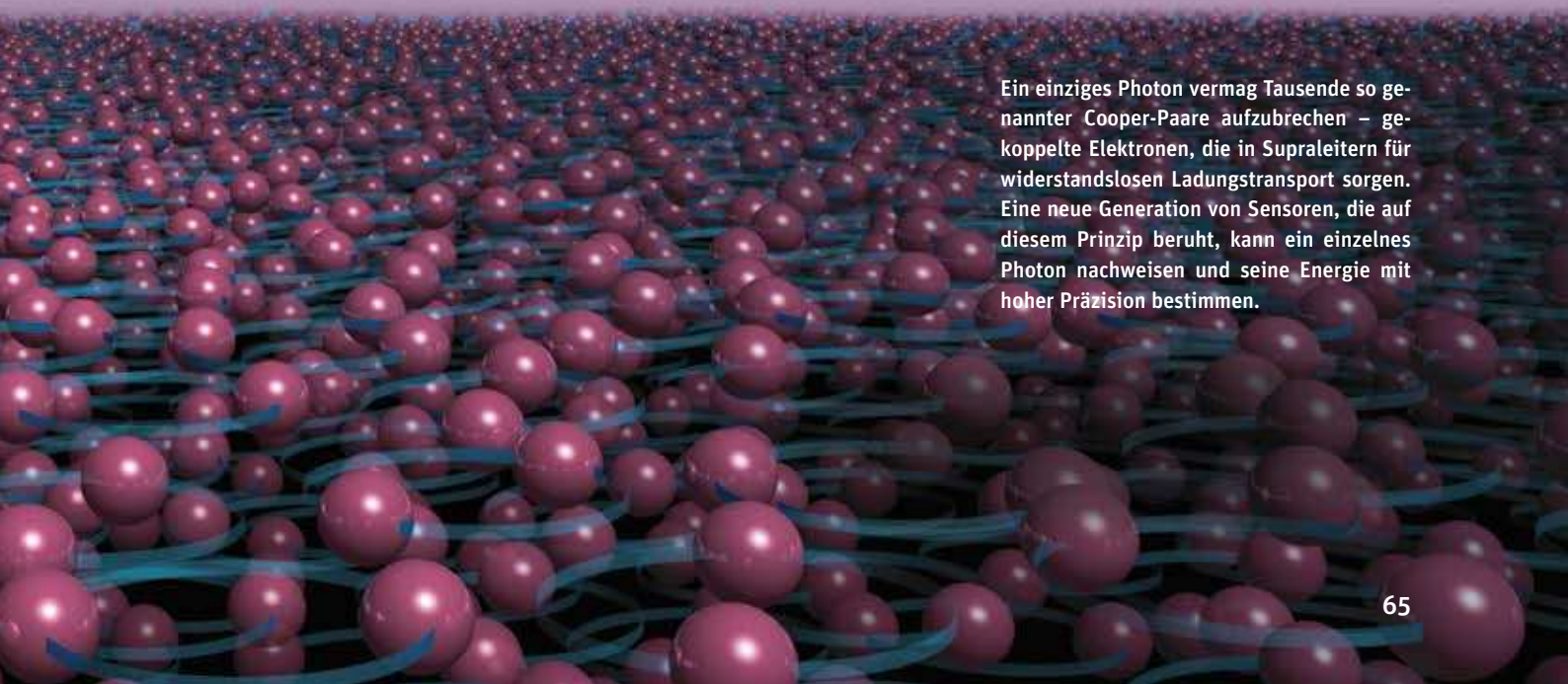
Unsere Augen sind exquisite Lichtdetektoren; sie bestimmen Intensität, Farbe und räumliche Verteilung der einfallenden Strahlen. Die menschliche Netzhaut hat mehr Pixel als eine handelsübliche Digitalkamera – sechs Millionen farbempfindliche Zellen namens Zapfen sowie mehr als hundert Millionen Stäbchenzellen, mit denen wir im Dunkeln sehen können. Ein dunkeladaptiertes Stäbchen vermag schon bei Absorption eines einzelnen Photons zu feuern, der kleinsten Quanteneinheit einer elektromagnetischen Welle. Nur sechs dieser Ein-Photon-Signale genügen, damit unser Gehirn einen Lichtblitz wahrnimmt.

Doch für viele Aufgaben sind Augen und handelsübliche Kameras keineswegs ideale Werkzeuge, denn sie entdecken nur Photonen, deren Frequenz im engen optischen Bereich liegt. Außerdem registrieren sie Farben, ohne die Frequenz jedes Photons präzise zu messen.

Hingegen dringen wissenschaftliche und industrielle Fotodetektoren in Wellenbereiche jenseits des sichtbaren Lichts vor, einerseits in den niederfrequenten – das heißt zugleich auch langwelligen und niederenergetischen – Infrarot- und Mikrowellenbereich, andererseits bis zu den hohen Frequenzen der Röntgen- und Gammastrahlung. Doch auch ihre Fähigkeiten sind beschränkt. Insbesondere fehlt bisher ein Detektor für optische Wellenlängen, der ein einzelnes Photon aufzuspüren und dessen Frequenz – und somit seine Energie – einigermaßen exakt zu bestimmen vermag. Die Frequenz des Photons birgt umfassende Auskunft über die Materie, aus der es emittiert wurde.

Derzeit findet auf diesem Gebiet eine regelrechte Revolution statt: Mit Hilfe der Supraleitung werden Fotodetektoren fähig, solch feine Messungen und andere Kunststücke auszuführen. Die neuen Werkzeuge steigern die Messempfindlichkeit dramatisch, und zwar über das gesamte elektromagnetische Spektrum hinweg – von Radiowellen über sichtbares Licht bis hin zu Gammastrahlen. Verbesserte Geräte zur Messung der Mikrowellen-Polarisation werden bald die ersten Momente des Universums erforschen, indem sie das Muster bestimmen, das die vom Urknall ausgehenden Gravitationswellen einst der kosmischen Hintergrundstrahlung aufgeprägt haben. Detektoren, die einzelne optische Photonen zählen können, verbessern die Sicherheit der Quanteninformationsverarbeitung. In Synchrotrons werden supraleitende Röntgen-Detektoren verwendet, um die chemische Zusammensetzung von Materialien zu untersuchen. Andere Forscher entwickeln Gammastrahlungsdetektoren, um den Diebstahl oder Schmuggel von nuklearem Material zu verhindern.

Supraleitende Geräte spüren nicht nur Photonen auf, sondern weisen auch ▷



SLIM FILMS

Ein einziges Photon vermag Tausende so genannter Cooper-Paare aufzubrechen – gekoppelte Elektronen, die in Supraleitern für widerstandslosen Ladungstransport sorgen. Eine neue Generation von Sensoren, die auf diesem Prinzip beruht, kann ein einzelnes Photon nachweisen und seine Energie mit hoher Präzision bestimmen.

▷ biologische Polymere nach – und sie suchen nach den schwach wechselwirkenden Teilchen, aus denen die rätselhafte Dunkle Materie besteht, die fünf Sechstel des Universums ausmacht. All diese Entwicklungen stehen freilich erst am Anfang.

Paradoxerweise macht just eine Eigenschaft der Supraleiter, die ihren Einsatz zur Energieübertragung einschränkt, ihren Vorteil als Fotodetektoren aus. Supraleitung – Stromfluss ohne elektrischen Widerstand – entsteht, wenn die Elektronen eines geeigneten Materials so genannte Cooper-Paare bilden, die dann widerstandslos wie eine Superflüssigkeit fließen. Dieser heikle quantenmechanische Effekt tritt nur auf, wenn das Material extrem tief – bis unter seine so genannte Sprungtemperatur – abgekühlt wird. Kühlung eines Materials reduziert die Vibrationen seiner Atome. Oberhalb der Sprungtemperatur verhindert die thermische Energie der Atomschwingungen die Bildung der Cooper-Paare und macht Supraleitung unmöglich.

Nützliche Anfälligkeit

Wegen dieser Wärmeempfindlichkeit müssen viele Supraleiter auf wenige Grad über dem absoluten Nullpunkt (null Kelvin oder minus 273,17 Grad Celsius) gekühlt werden, manche sogar auf wenige hundertstel Kelvin. Solch extreme Temperaturen lassen sich zwar mit kommerziellen Kühlgeräten erreichen, die flüssiges Helium oder einen Prozess namens adiabatische Entmagnetisierung verwenden, aber viele Anwendungen werden dadurch ausgeschlossen. Wissenschaftler suchen seit Jahren nach robusteren Supraleitern, die bei höheren Temperaturen funktionieren.

Doch gerade die Anfälligkeit der Supraleitung ist für empfindliche Sensoren ideal. Supraleitende Fotodetektoren nutzen die Tatsache, dass die Energie eines einzelnen Photons ausreicht, tausende Cooper-Paare aufzubrechen. Die Veränderung des supraleitenden Zustands kann dann auf verschiedene Weise gemessen werden und zeigt die vom Photon abgegebene Energie an. Die wiederum ist proportional zur Frequenz, und die Frequenz des Photons liefert wichtige Informationen über das Objekt, von dem es ausging.

Gerade weil die Supraleitung extrem anfällig für winzigste Störungen ist, eignet sie sich für extrem empfindliche Sensoren

Auch Halbleiterdetektoren wie der CCD-Fotosensor einer digitalen Kamera beruhen auf der Störung eines Quantenzustands im Material, allerdings bei Raumtemperatur; CCD steht für *charge coupled device*, ladungsgekoppeltes Gerät. Im CCD schlägt ein optisches Photon ein Elektron aus einem Energieband in einem Halbleiterkristall. In solchen Bändern sind die Elektronen so stark gebunden, dass meist nur ein Elektron pro Photon freigesetzt wird. Dieser Effekt ist zu grob, als dass daraus die Frequenz des Photons hervorginge. Darum vermag ein CCD die Farbe eines Photons nicht direkt zu messen; digitale Kameras erzeugen Farbbilder durch ein System von roten, grünen und blauen Filtern, die alle Photonen eines gewissen Frequenzbereichs durchlassen.

Hingegen vermag ein optisches Photon tausende Cooper-Paare in einem Supraleiter aufzubrechen. Das simultane Erzeugen zahlreicher Anregungen ermöglicht eine präzise Energiemessung – wie eine Wahlumfrage, die genauer wird, wenn Tausende ihre Meinung abgeben.

Detektoren, die mit der Störung von Supraleitung arbeiten, fallen in zwei Gruppen. Der thermische Typ wird genau auf seine Sprungtemperatur gekühlt; dadurch ist er nur teilweise im supraleitenden Zustand, und thermische Anregungen stehen knapp davor, die Supraleitung komplett zu zerstören. Jede an den Supraleiter abgegebene Energie erhöht seine Temperatur und steigert dadurch seinen elektrischen Widerstand deutlich. Der zweite, paarbrechende Detektortyp wird hingegen ein gutes Stück unter die Sprungtemperatur gekühlt und ist ganz im supraleitenden Zustand. Dieser Detektor misst die Anzahl der Cooper-Paare, die bei Energieabgabe an den Supraleiter aufgebrochen werden.

Der Vollständigkeit halber muss eine dritte Variante erwähnt werden: Ein supraleitender »Mischer« funktioniert als eine Art Verstärker für niederfrequente elektromagnetische Signale, etwa für Mikrowellen. Da solche Apparate nicht die Störanfälligkeit der Supraleitung nutzen, werden sie in diesem Artikel nicht weiter diskutiert.

Der thermische Detektortyp beruht auf der Tatsache, dass der elektrische Widerstand eines Supraleiters in dem engen Temperaturbereich, in dem das Material vom supraleitenden in den normalen Zustand übergeht, einen scharfen Sprung von null zum Normalwert macht (siehe Kasten auf der rechten Seite). Durch den abrupten Wechsel des Widerstands kann der Supraleiter als ultraempfindliches Thermometer dienen. Ein Detektor, der den supraleitenden Phasenübergang in dieser Weise nutzt, heißt TES (abgekürzt für *transition-edge sensor*, etwa: Sprungkantensensor). Wenn ein TES ein Photon absorbiert, wird dessen Energie in Wärme verwandelt; entsprechend steigen Temperatur und Widerstand des Materials. Je nach verwendetem Material kann ein TES als Spektrometer zum Messen der ▷

In Kürze

- Sensoren, die **ein einzelnes Lichtquant entdecken** und seine Energie messen können, versprechen zahlreiche wissenschaftliche und technische Anwendungen: Sie spüren radioaktives Material auf, analysieren Defekte in Mikrochips, enthüllen lichtschwache Himmelskörper, helfen kosmologische Rätsel zu klären und erstellen chemische Analysen.
- Eine neue Generation solcher Sensoren beruht auf **Supraleitern**. Sie messen Photonenenergien viel präziser und schneller.
- Es gibt zwei Typen dieser Detektoren. **Thermische Sensoren** reagieren auf die Erwärmung des Detektormaterials durch die Energie einzelner Photonen. Bei **paarbrechenden Detektoren** zerstört das Photon einige so genannte Cooper-Paare – Elektronenpaare, auf denen die Supraleitung beruht.

Wie ein Supraleiter Licht entdeckt

Supraleitende Photon-Detektoren vom thermischen oder paarbrechenden Typ geben die Energie eines einzelnen Photons – und somit seine Frequenz – durch die Stärke des Output-Signals wieder. Rechts ist eine quadratische 64-Pixel-Anordnung von thermischen Sensoren abgebildet, die zugleich als Röntgenkamera und hochauflösendes Röntgenspektrometer dient. Ganz rechts wird eine Squid-Multiplex-Schaltung gezeigt (Erklärung unten).

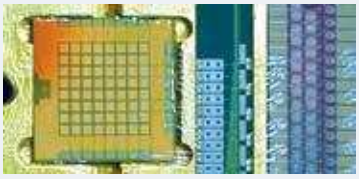
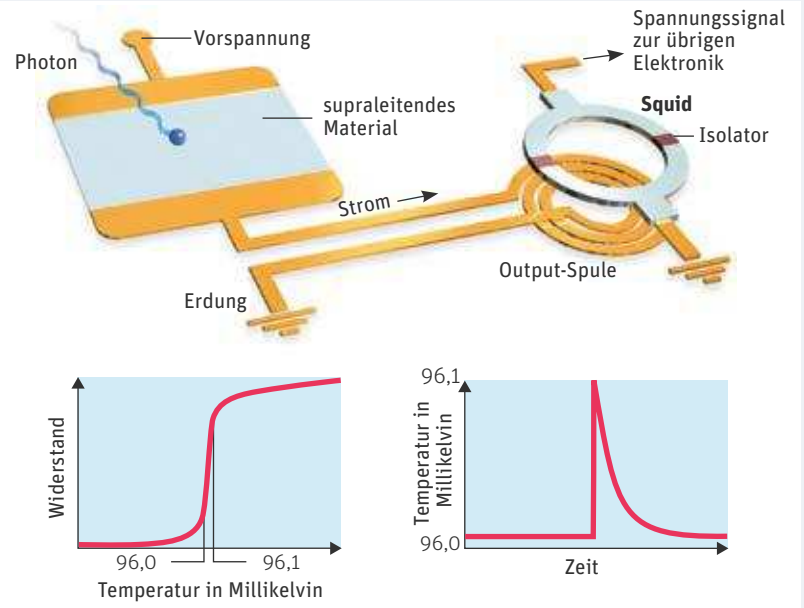


FOTO: KENT D. IRWIN

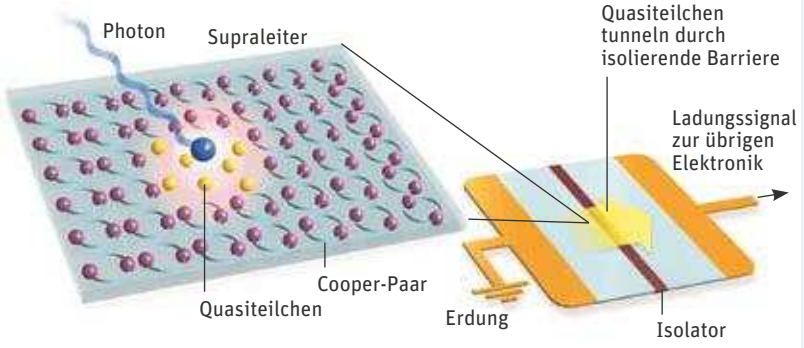
Thermische Detektoren

Die häufigste Form des thermischen supraleitenden Detektors ist der Sprungkantensensor; er wird genau bis zur Mitte des sehr engen Temperaturbereichs gekühlt, in dem sein aktives Material von der Supraleitung zum Normalzustand übergeht (Diagramm unten links). Eine Vorspannung stabilisiert ihn bei dieser Sprungtemperatur und erzeugt einen gleichmäßigen Strom. Bei Absorption eines Photons erwärmt sich der Sensor kurz um einen winzigen Betrag (unten rechts); dadurch nimmt der Widerstand des Sensors deutlich zu. Ein supraleitendes Gerät namens Squid entdeckt den dadurch verursachten momentanen Stromabfall und verwandelt ihn in einen Spannungspuls, der durch konventionelle Elektronik verstärkt und abgelesen wird.



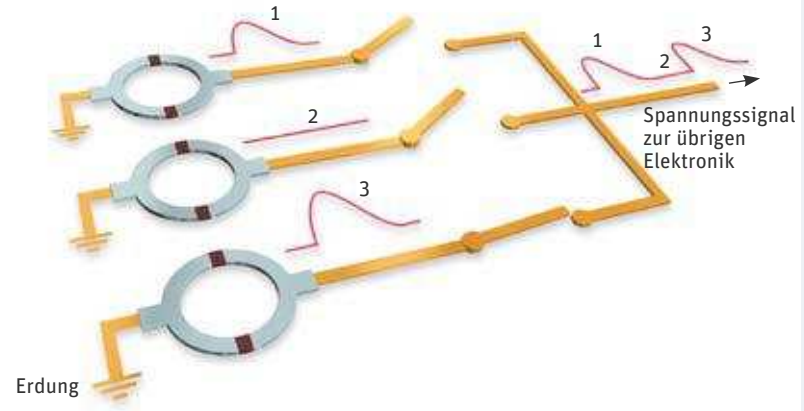
Paarbrechende Detektoren

Der andere Sensortyp wird zunächst durch Kühlung vollständig in seine supraleitende Phase versetzt; dabei bilden die Elektronen Cooper-Paare. Ein einzelnes Photon hat genug Energie, um tausende Cooper-Paare aufzubrechen und in angeregte Elektronen umzuwandeln, so genannte Quasiteilchen (links). Das Material bleibt zwar supraleitend, doch die Quasiteilchen lassen sich nachweisen, weil sie – anders als die Cooper-Paare – durch eine isolierende Barriere tunneln und einen Ladungspuls erzeugen, der zu gewöhnlicher Elektronik weitergeleitet wird



Bilderzeugung durch Multiplex-Technik

Für bildgebende Verfahren werden zahlreiche Detektoren flächig angeordnet, doch die Outputsignale sämtlicher Detektoren müssen durch so genannte Multiplex-Technik zu einer kleineren Anzahl von Datensträngen kombiniert werden. Beim Zeit-Multiplex-Verfahren werden die Outputs mehrerer Squids mit einem einzigen Datenstrang verbunden. Die Squids arbeiten wie Schalter, die einer nach dem anderen geschlossen werden und das Signalmuster (1 – 3) des Detektors in eine Pulsfolge verwandeln. Die nachgeschaltete Elektronik identifiziert die Einzelpulse durch deren präzise zeitliche Abfolge.



ILLUSTRATIONEN: SLIM FILMS; TEMPERATURKURVEN: DANIELA-NAOMI MOLNAR

▷ Energie von Röntgen- und Gammastrahlen dienen, als Photonenzähler bei optischen bis infraroten Wellenlängen oder als Gesamtleistungsdetektor für Strahlung in infraroten und Millimeterwellenbändern.

Die ersten TES-Detektoren wurden schon in den 1940er Jahren entwickelt, blieben aber lange Zeit unbrauchbar. Es erwies sich als sehr schwierig, die Temperatur des Geräts im Bereich des supraleitenden Übergangs zu halten, der oft weniger als ein tausendstel Grad breit ist. Gegen Ende meines Studiums bei Blas Cabrera an der Stanford-Universität entwickelte unsere Forschungsgruppe gekoppelte TES-Detektoren zur Untersuchung von Neutrinos aus Kernreaktoren und für den Nachweis Dunkler Materie. Wir konnten ein paar TES-Detektoren in Gang bringen, aber wegen kleiner Unterschiede in der Sprungtemperatur verschiedener Sensoren war es unmöglich, mehrere gekoppelte Sensoren bei derselben Temperatur zu betreiben.

Im Jahr 1993 fand ich einen einfachen Trick zur Lösung des Problems: Man legt an alle Detektoren eine konstante Vorspannung an. Sie erzeugt einen durch den TES fließenden Strom, der den Detektor erwärmt. Bei Erreichen der Sprungtemperatur steigt der Widerstand plötzlich an, der Strom nimmt ab, und die Erwärmung hört auf. Somit wirkt die Selbsterwärmung als negative Rückkopplung, welche die Temperatur der Schicht innerhalb des Sprungbereichs hält. In einer Anordnung vorgespannter Sensoren erwärmt sich jeder Sensor von selbst bis zu seiner eigenen Sprungtemperatur, selbst wenn dieser Wert von Sensor zu Sensor leicht variiert. Die negative Rückkopplung beschleunigt außerdem die Reaktion der Detektoren. Die Einführung des Vorspannungstricks hat die Entwicklung von TES-Detektoranordnungen weltweit enorm beschleunigt.

Anders als beim thermischen Sensor tritt bei einem paarbrechenden Detektor kein Sprung des elektrischen Widerstands auf, um die Absorption eines Photons zu signalisieren. Ein ankommendes Photon bricht Cooper-Paare auf und erzeugt Quasiteilchen, die man sich im Regelfall als freie Elektronen in einem ansonsten supraleitenden Metall vorstellen kann.

Die Anzahl der erzeugten Quasiteilchen ist proportional zur Energie des Photons. Da dieser Detektortyp deutlich unter seine Sprungtemperatur gekühlt ist, gibt es immer noch ein Meer von intakten Cooper-Paaren, und der elektrische Widerstand bleibt null. Darum muss ein paarbrechender Detektor zwischen Cooper-Paaren und Quasiteilchen unterscheiden können.

Wie man Quasipartikel zählt

Ein dazu fähiges Gerät ist der supraleitende Tunnelkontakt; er besteht aus zwei supraleitenden Schichten, die durch eine dünne Schicht aus isolierendem Material getrennt sind. Falls der Isolator dünn genug ist – rund zwei Nanometer (millionstel Millimeter) –, können Elektronen quantenmechanisch »durchtunneln«, das heißt von einer Seite der Barriere zur anderen gelangen. Anlegen eines schwachen äußeren Magnetfelds hindert die Cooper-Paare am Durchtunneln des Kontakts, sodass nur noch Quasiteilchen passieren können.

Wird nun eine Spannung an das Gerät gelegt, so kann kein Strom fließen, bis eine der supraleitenden Schichten ein Photon absorbiert, das Quasiteilchen erzeugt. Der resultierende Strompuls ist proportional zur Anzahl der erzeugten Quasiteilchen und somit zu Energie und Frequenz des Photons. Ein Team um Jonas Zmuidzinas vom California Institute of Technology und Peter Day vom Jet Propulsion Laboratory entwickelt einen anderen Apparat, um die Anzahl der Quasipartikel zu messen. Dieser so genannte Kinetische-Induktanz-Detektor nutzt die Tatsache, dass ein supraleitendes Gebilde eine elektromagnetische Resonanz bei einer bestimmten Mikrowellenfrequenz haben kann – ähnlich wie eine Stimmgabel, die bei einer Schallfrequenz in mechanische Resonanz gerät. Doch während Stimmgabeln vibrieren, fließt im Supraleiter ein Wechselstrom. Sobald Photonen im Supraleiter Quasiteilchen erzeugen, wird die Resonanz unschärfer, die Wellenausbreitung verlangsamt sich, und die Resonanzfrequenz sinkt. Die Veränderung von Resonanzfrequenz und Resonanzschärfe ist proportional zur Anzahl der Quasiteilchen. Erste Resultate mit diesen Geräten sind sehr viel versprechend.

Bildgebende Verfahren erfordern eine flächige Anordnung zahlreicher Detektoren – ganz ähnlich wie die CCD-Pixel in einer Digitalkamera

Für manche Anwendungen sind einzelne supraleitende Detektoren nützlich, etwa zur Materialanalyse, doch bildgebende Verfahren erfordern eine flächige Anordnung zahlreicher Detektoren oder Pixel, ganz ähnlich wie die CCDs in einer Digitalkamera. Nur: Wie verbindet man die ultrakalte Detektoranordnung mit der zugehörigen Elektronik bei Raumtemperatur? Wenn man einfach jedes Pixel mit einem Draht verbindet, fließt zu viel Wärme durch die Drähte und zerstört die Supraleitung der Detektoren. Besser ist es, Schaltkreise innerhalb des ultrakalten Teils des Geräts einzurichten, die Signale vieler Pixel zu kombinieren und über wenige Multiplex-Leitungen zur warmen Elektronik zu führen.

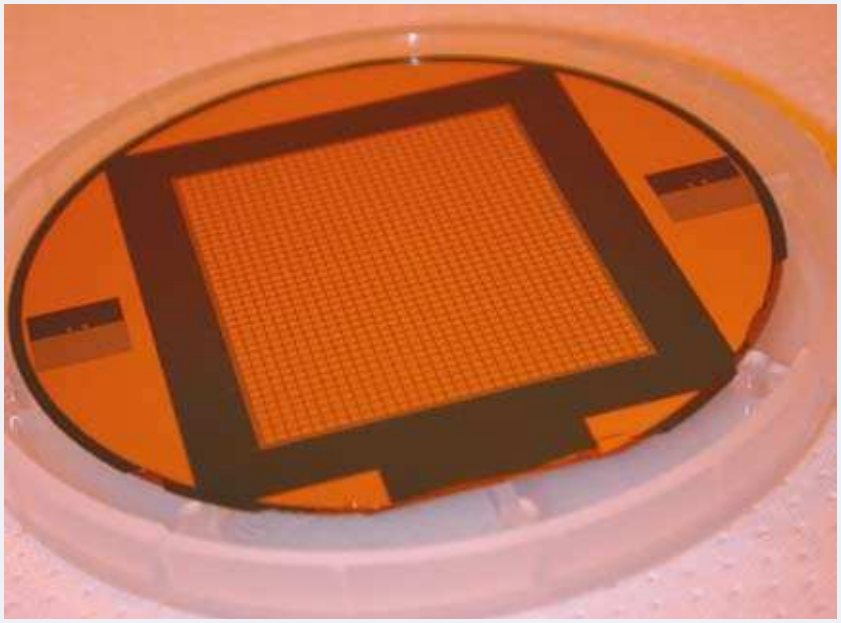
Die modernsten supraleitenden Multiplex-Anordnungen beruhen auf TES-Detektoren. Wenn ein TES ein Photon absorbiert, verändert sich der durch den Detektor laufende Strom. Da dieser Strom sehr schwach ist, wird jedes Pixel mit einem supraleitenden Quanteninterferometer (Squid, *superconducting quantum interference device*) verbunden, dessen Empfindlichkeit nur durch die Quantenmechanik begrenzt ist. Das Squid verwandelt den winzigen Strompuls in ein Spannungssignal, das mit herkömmlicher Elektronik gemessen werden kann.

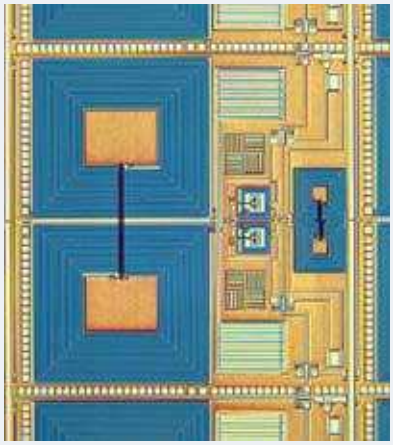
Die Outputs vieler Squids lassen sich zusammenfassen, indem ihre Spannungen addiert und als Summe in einen einzigen Draht gespeist werden – aber wie unterscheidet man dann die Signale der einzelnen Detektoren? Beim Zeit-Multiplex-Verfahren werden die Squids eines nach dem anderen eingeschaltet; beim Frequenz-Multiplex-Verfahren operieren die Detektoren bei unterschiedlichen Frequenzen, wodurch sich ihre Signale später trennen lassen.

Auch für die Pixel eines Kinetische-Induktanz-Detektors – des Typs, der wie eine Stimmgabel oszilliert – eignet sich die Multiplex-Technik: Die Pixel werden auf unterschiedliche Resonanzfrequenzen abgestimmt, parallel verbunden und mit

Submillimeter-Astronomie

Bei Wellenlängen unterhalb eines Millimeters offenbaren sich Gebiete in astronomischen Molekülwolken, die bei anderen Wellenlängen verborgen bleiben. Solche Wolken spielen eine wichtige Rolle bei der Entstehung von Planeten, Sternen und Galaxien. Der problematische Wellenlängenbereich wird durch die Entwicklung der Scuba-2-Kamera viel zugänglicher werden; sie soll 2007 im James-Clerk-Maxwell-Teleskop (rechts) auf dem Mauna Kea in Hawaii installiert werden. Die Kamera besteht aus acht Anordnungen von je 1280 supraleitenden Sprungkantensensoren.





Jede Sensoranordnung (links) wird mit einem Squid-Multiplex-Chip verbunden; das Detailbild oben zeigt ein einzelnes Pixel des Multiplex-Chips.

CHIPS: NIST, GENE HILTON; TELESKOP: NIK SZYMANEK

einem kalten Transistor ausgelesen, der über eine Outputleitung mit einem Verstärker bei Raumtemperatur verbunden ist. Große Gruppen von Tunnelkontakt-Detektoren lassen sich zwar bisher nur schwer auswerten, doch neue Verfahren zum Auslesen von Mikrowellen könnten auch hier Multiplex-Anordnungen ermöglichen.

Katzenstreu-Alarm

Die heute verfügbaren supraleitenden Detektoren sind zehn- bis hundertmal empfindlicher als herkömmliche Detektoren bei Raumtemperatur. Das ermöglicht höhere Präzision in den unterschiedlichsten Bereichen.

Kontrolle spaltbaren Materials. Ein drängendes Problem ist die Überwachung von nuklearem Material, das von einzelnen Terroristen oder ganzen Staaten missbraucht werden könnte. Nuklearmaterialien enthalten instabile Isotope, die Röntgen- und Gammastrahlen emittieren. Die charakteristischen Energien dieser Photonen verraten, welche radioaktiven Isotope vorhanden sind. Leider emittieren einige Isotope, die bei gutartigen Anwendungen auftreten, Gammastrahlen mit sehr ähnlichen Energien wie waffenfähiges Material; das führt zu zweifelhaftem Nachweis und falschem Alarm.

Die USA installieren derzeit an den Grenzübergängen zu Kanada und Mexiko tausende Portalmonitore für den Nachweis nuklearer Substanzen. Im schlimmsten Fall könnten Terroristen hoch angereichertes Uran ins Land schmuggeln, um eine primitive Atombombe vom Hiroshima-Typ zu bauen (siehe »Die vermeidbare Katastrophe?« von Alexander Glaser und Frank N. von Hippel, Spektrum der Wissenschaft 8/2006, S. 68). Das wichtigste Indiz für hoch angereichertes Uran ist die von Uran-235 ausgehende Gammastrahlung mit 185,7 keV (Kiloelektronenvolt) Energie. Allerdings ist sie kaum von den Gammastrahlen mit 186,1 keV zu unterscheiden, die das in Katzenstreu und anderen Materialien enthaltene Radium-226 aussendet. Dieses so genannte Katzenstreuproblem ist die häufigste Ursache für falschen Alarm an den Grenzübergängen der USA.

Ein Team um Michael Rabin vom Los Alamos National Laboratory (New Mexico) und Joel Ullom vom National Institute of Standards and Technology (NIST) in Boulder (Colorado) sowie ein zweites Team am Lawrence Livermore National Laboratory in Livermore (Kalifornien) haben Gammadetektoren entwickelt, die auf TES-Technik beruhen und eine mehr als zehnmal höhere Energieauflösung bieten als herkömmliche Geräte. Solche Detektoren können mehr Linien in den komplizierten Gammaspektren von Uran- und Plutonium-Isotopengemischen auflösen (siehe die Diagramme auf der nächsten Seite). Diese speziell für die Verifikation internationaler Nichtweitergabeverträge entwickelten Geräte bestimmen den Pluto- ▷

niumgehalt abgebrannter Kernbrennstäbe. Sie können aber auch zwischen dem Radium-226 in Katzenstreu und dem Uran-235 in hoch angereichertem Uran unterscheiden. Falls ein herkömmlicher tragbarer Detektor oder Portalmonitor ein Gamma-Signal entdeckt, vermag ein supraleitendes Gerät im zweiten Schritt eindeutig das emittierende Isotop zu bestimmen und falschen Alarm zu verhindern.

Mikrochip-Analyse. Für die Halbleiterindustrie ist die Elektronenstrahl-Mikroanalyse *(electron-probe microanalysis)* ein wichtiges Werkzeug. Wenn ein Rasterelektronenmikroskop eine Probe abbildet, emittiert die vom Elektronenstrahl getroffene Probe Röntgenstrahlen. Die chemische Zusammensetzung der Probe lässt sich innerhalb des nur nanometergroßen Elektronenstrahlbereichs bestimmen, indem man die unterschiedlichen Energien der emittierten Röntgenstrahlen misst. Während der Strahl die gesamte Probe überstreicht, zeigt das erzeugte Bild, wo verschiedene chemische Bedingungen herrschen, und liefert eine genaue Karte der Strukturen, welche die Funktion eines Mikrochips definieren.

Derzeit nutzt die Halbleiterindustrie zur Chipkontrolle Halbleiter-Röntgendetektoren. Doch mit fortschreitender Miniaturisierung der Chips werden neue Generationen von empfindlicheren Mikroanalyse-Instrumenten nötig. Meine Gruppe am NIST hat darum Systeme mit TES-Detektoren entwickelt, deren Energieauflösung fünfzigmal besser ist als die der bisher erhältlichen Halbleiterdetektoren. Solche Mikroanalyse-Systeme können viele wichtige Röntgenlinien auflösen und werden nun marktreif.

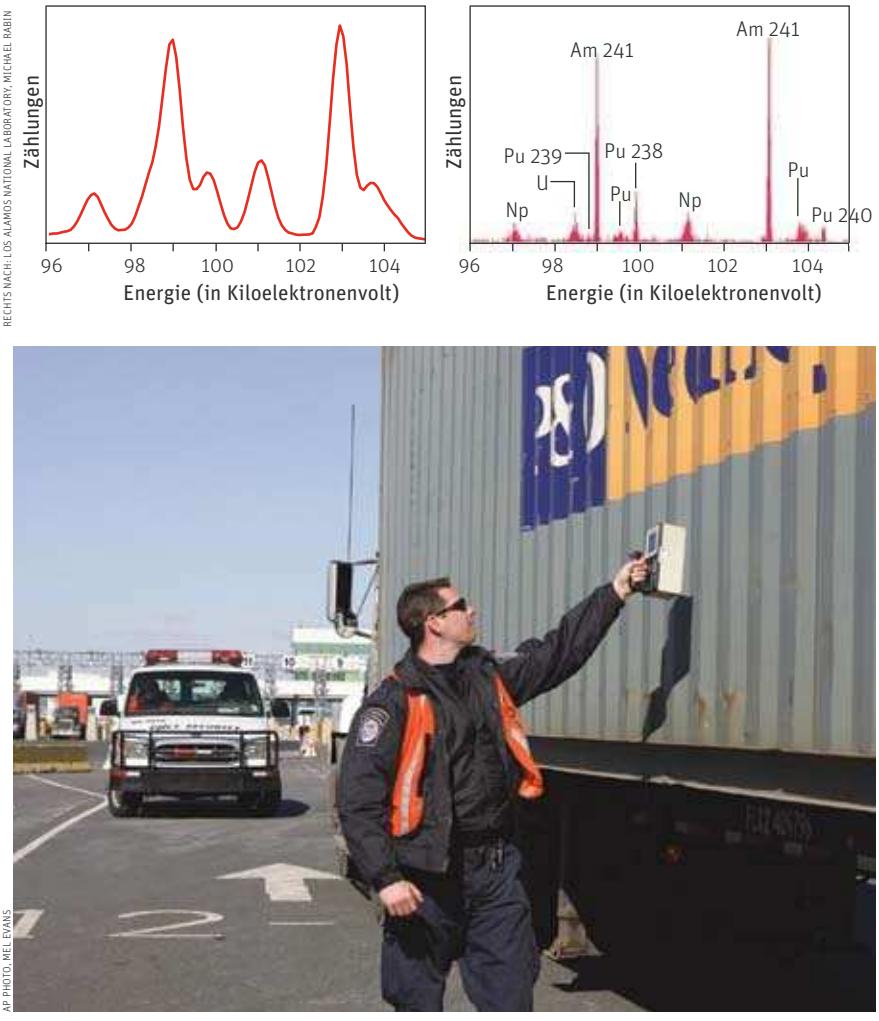
Signale aus den Tiefen des Alls

Submillimeter-Astronomie. Für supraleitende Detektoren bietet die Astronomie ein weites Anwendungsgebiet. Oft haben gerade Astronomen die Detektortechnik vorangetrieben, weil sie sehr schwache Signale von weit entfernten Objekten messen müssen.

Meine NIST-Gruppe entwickelt zusammen mit dem britischen Astronomy Technology Center in Edinburgh (Schottland), mit der Firma Raytheon Vision Systems in Goleta (Kalifornien) sowie mit britischen und kanadischen Universitäten eine supraleitende Kamera namens Scuba-2, die am James-Clerk-Maxwell-Teleskop auf dem Mauna Kea in Hawaii installiert werden soll. Scuba-2 wird das Submillimeter Common-User Bolometer Array (Scuba) ersetzen, eine vom britischen Astronomietechnikzentrum entwickelte Detektoranordnung auf Halbleiterbasis. Scuba bildet Regionen, in denen Planeten, Sterne und Galaxien entstehen, im Submillimeterbereich ab, das heißt bei Wellenlängen, die kleiner sind als Mikrowellen, aber größer als sichtbares Licht.

Bis vor Kurzem war dieser Wellenlängenbereich den Astronomen kaum zugänglich, denn Submillimeter-Photonen haben zu wenig Energie, um Elektronen in Halbleitern anzuregen, aber eine zu hohe Frequenz, als dass sie sich nach dem Prinzip des Radioempfängers wirksam verstärken ließen. Der Submillimeterbereich ist jedoch hochinteressant: Er enthält 98 Prozent der seit dem Urknall emittierten Photonen. Unter anderem erlaubt er Einblicke ins Innere von Molekülwolken, das anderen Wellenlängen verborgen bleibt. Scuba erzeugt Bilder, indem es die Erwärmung seiner 128 gekühlten Halbleiterpixel separat nachweist; die Supraleitungstechnik von Scuba-2 wird schneller und viel empfindlicher arbeiten.

Nach seiner Fertigstellung wird Scuba-2 aus mehr als zehntausend TES-Detektoren bestehen, die mit supraleitenden Multiplex-Schaltungen ausgelesen werden; auf diese Weise lassen sich astronomische Objekte bis zu tausend-



DANIELA-NAOMI MOLNAR, LINKS NACH: NIST; JOEL ULLOM, RECHTS NACH: LOS ALAMOS NATIONAL LABORATORY; MICHAEL RABIN

AP PHOTO, MEL EVANS

Bei der Grenzkontrolle soll ein Detektor geschmuggeltes Nuklearmaterial an den Spektren der emittierten Röntgen- und Gammastrahlung erkennen (Foto). Ein herkömmlicher Halbleitersensor vermag nicht alle Isotope einer Testprobe zu unterscheiden (linkes Diagramm). Messungen mit einem supraleitenden Detektor lösen alle Spektrallinien auf (rechtes Diagramm) und identifizieren insbesondere Plutonium-239, das in Nuklearwaffen verwendet wird.

Sprachen *können*, so *einfach* wie nie …

… mit dem einmaligen Magazinkonzept aus dem Spotlight Verlag:
garantierter Spracherfolg – schnell, effizient und dauerhaft.

Business-Englisch

Englisch

Englisch für junge Leser

Spanisch

Italienisch

Französisch

Deutsch als Fremdsprache

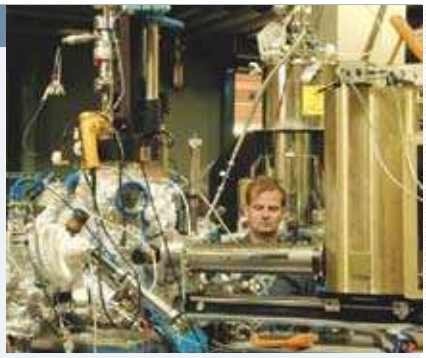
VON EUROPAS NR. 1 FÜR SPRACHMAGAZINE

www.spotlight-verlag.de

Weitere Anwendungen

Zusätzlich zu den im Artikel diskutierten Anwendungen werden supraleitende Detektoren bereits folgendermaßen genutzt:

- Röntgen-Spektroskopie in Synchrotrons (rechts), um die **chemische Zusammensetzung** einer Probe zu analysieren;
- Wirksamer Nachweis großer **biologischer Polymere** und DNA-Fragmente in Massenspektrometern für Genom- und Protein-Analysen, für die Entwicklung von Medikamenten und zur Analyse natürlicher Verbindungen;
- Für die **Quantenkryptografie** zur Photonenzählung bei den für Datenübertragung geeigneten Infrarot-Wellenlängen;
- Suche nach schwach wechselwirkenden Masseteilchen, aus denen die **Dunkle Materie** im Universum bestehen soll.



LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY, STEPHAN FRIEDRICH

Ein Experiment am Synchrotron des Lawrence Berkeley National Laboratory

▷ mal schneller abbilden. Als Prototypen wurden bereits Teilanordnungen zu je 1280 Pixeln hergestellt (siehe Kasten auf S. 69), und die komplette Kamera soll noch in diesem Jahr am Teleskop den Betrieb aufnehmen. Für verschiedene Observatorien und Satelliten sind viele weitere supraleitende Detektorsysteme in der Entwicklung, die bei Submillimeter- und Millimeter-Wellenlängen operieren.

Kosmologie. Einige der wichtigsten Erkenntnisse über unser Universum stammen von Messungen der kosmischen Hintergrundstrahlung. Die Photonen dieses Mikrowellenhintergrunds sind ein Schnappschuss des Kosmos, wie er rund 400 000 Jahre nach dem Urknall aussah, denn in den letzten 13 Milliarden Jahren haben die meisten dieser Photonen ungestört das All durchquert. Schallwellen im Plasma des frühen Universums erzeugten in der Hintergrundstrahlung feine Muster, welche die Astronomen heute registrieren (siehe »Die Symphonie der Schöpfung« von Wayne Hu und Martin White, Spektrum der Wissenschaft 5/2004, S. 48).

Nachbeben des Urknalls

Messungen dieser Muster sowie andere kosmologische Beobachtungen haben gezeigt, dass der heutige Kosmos nur zu rund fünf Prozent aus uns vertrauter Materie und Energie besteht; 22 Prozent macht die Dunkle Materie aus, und 73 Prozent entfallen auf ein geheimnisvolles Feld namens Dunkle Energie.

Zusätzlich zu diesen Schallwellenmustern muss es noch subtilere Muster des Strahlungshintergrunds geben, welche dessen Polarisation betreffen; bei polarisiertem Licht schwingt das elektrische Feld der elektromagnetischen Welle nicht beliebig in allen Schwingungsebenen, sondern nur in der Polarisationsrichtung. Dieser so genannte kosmische Gravitationswellenhintergrund stammt aus der Ära der Inflation, einer Phase rapider kosmischer Expansion. Die Polarisation der Hintergrundstrahlung entstand, als die Strahlung am primordialen Plasma gestreut wurde; bekanntlich wird auch sichtbares Licht durch Reflexion an einer Oberfläche polarisiert.

Bald werden die Astronomen mit polarisationsempfindlichen supraleitenden Detektoren nach dem kosmischen Gravitationswellenhintergrund suchen. Zunächst sollen spezielle Teleskope vom Boden und von Ballons aus die Geräte anwenden. Später wird Nasa-Plänen zufolge ein Satellit namens Inflation Probe die endgültigen Polarisationsmessungen durchführen. Eine erfolgreiche Kartierung dieser Gravitationswellenmuster würde Aufschluss über die Physik in den ersten 10^{-36} Sekunden nach dem Urknall geben; damals waren alle Kräfte mit Ausnahme der Gravitation zu einer einzigen Urkraft vereinigt. Seit Albert Einstein träumen die Physiker davon, dieses Regime der »großen Vereinigung« direkt zu untersuchen, aber selbst die Energie der größten irdischen Teilchenbeschleuniger ist dafür eine Billion Mal zu schwach. Erst mit supraleitenden Detektoren werden Forscher den Kosmos als Labor nutzen und in Energiebereiche vordringen, die irdischen Experimenten für immer verschlossen bleiben.

Trotz der dramatischen Fortschritte, welche die Detektortechnik im letzten Jahrzehnt gemacht hat, sind die Möglichkeiten supraleitender Geräte längst nicht ausgeschöpft. Der Nutzen der CCDs machte sich erst so recht bemerkbar, als mit extrem großen Pixelanordnungen Bilder aufgenommen wurden. Ein Blick in die Zukunft zeigt großflächige Anordnungen von supraleitenden Detektoren, mit bis zu zehntausend Pixeln für Millimeterwellen und Millionen Pixeln im Röntgenbereich. Sie werden neue Fabrikationstechniken erfordern und Multiplex-Verfahren bei Mikrowellenfrequenzen nutzen, um viel mehr Pixel mit einem einzigen Draht auslesen zu können. Ingenieure entwickeln kleinere und billigere Kühlsysteme für die Supraleitung. Die großen Detektorfelder werden zwar auch künftig weniger Pixel haben als die menschliche Netzhaut, aber wir dürfen uns von diesen künstlichen Augen völlig neue Einsichten erhoffen. ◁

Kent D. Irwin leitet das Quantensensor-Projekt am National Institute of Standards and Technology (NIST) in Boulder (Colorado). Er lehrt Astrophysik und Planetenforschung an der Universität von Colorado in Boulder. Zu seinen Forschungsinteressen gehören Präzisionsmessungen elektromagnetischer Signale für die Kosmologie sowie die fundamentalen thermodynamischen und quantenmechanischen Grenzen von Sensoren und Detektoren.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Transition-edge sensors. Von K. D. Irwin und G. C. Hilton in: Cryogenic particle detection. Von Christian Enss (Hg.). Springer, 2005

Quantum calorimetry. Von Caroline K. Stahle, Dan McCammon und Kent D. Irwin in: Physics Today, Bd. 52, S. 32, 1999

Low-temperature particle detectors. Von Norman E. Booth, Blas Cabrera und Ettore Fiorini in: Annual Review of Nuclear and Particle Science, Bd. 46, S. 471, 1996

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/858952.

NOAA / UNIVERSITÄT WASHINGTON

Aus bienenstockartigen Mineralhügeln am Mittelatlantischen Rücken treten Fluide aus, die fast partikelfrei, stark alkalisch und etwa 90 Grad Celsius warm sind. Sie lassen sich am Schimmern oberhalb des Kegels erkennen. An solchen Hydrothermalquellen in der Tiefsee entstanden die ersten Lebewesen.

$$\{210CO_2 + H_2PO_4^- + Fe, Mn, Ni, Co, Zn^{2+}\}^{Ozean} + \{407H_2 + 10NH_3 + HS^-\}^{heiße\ Quelle} \rightarrow$$

Der heiße Ursprung des Lebens

Poren und verborgene Hohlräume in Mineralen am Rand warmer alkalischer Quellen in der Tiefsee waren die Brutstätten der ersten Organismen.

Von Michael Russell

Die Wunder der Natur verlieren nichts von ihrer Faszination, wenn die Wissenschaft eine Erklärung für sie findet. Obwohl wir heute wissen, warum Vögel fliegen können oder Diamanten funkeln, versetzt uns beides weiterhin in Entzücken. Und obgleich wir auch die physikalischen Hintergründe der thermischen Konvektion im Detail verstehen, bleiben die Geysire im Yellowstone-Nationalpark – als spektakulärste Beispiele dafür – ein hinreißendes Schauspiel.

Zyklische Strömungen von Magma, Wasser oder Luft auf Grund temperaturbedingter Dichteunterschiede bilden aber nicht nur die Triebkraft von »Old Faithful«, sondern sind die Wärmekraftmaschinen der Erde schlechthin. Sie lassen Kontinente wandern oder Vulkane ausbrechen, mischen die Nährstoffe im Ozean und erzeugen das Wetter. Dabei schafft die Konvektion auch beständig neue Gebiete mit hohem chemischem Potenzial. Und vor etwa vier Milliarden Jahren – die Erde war erst ein paar hundert Millionen Jahre alt – ermöglichte dieses Potenzial einige schicksalsträchtige chemische Reaktionen, die jenen Vorgang einleiteten, dem wir letztlich unsere Existenz verdanken.

Obwohl niemand sicher weiß, wie das Leben begann, können Geochemiker, welche die junge Erde erforschen, in Kenntnis der damaligen Bedingungen plausible Vermutungen darüber anstellen und sie prüfen. Die Frage heißt dann nicht: »War es so?«, sondern: »Könnte es so gewesen sein?« Und wenn die Antwort bei jedem Schritt lautet: »Ja, das wäre möglich«, gelangen wir zu einem plausiblen Entwicklungspfad vom Rohmaterial des Universums bis hin zu uns selbst. In diesem Sinn möchte ich hier einige der möglichen Etappen auf dem Weg von einer toten Flüssigkeit zu einer üppig wuchernden Pflanze skizzieren.

Zwei Moleküle schreiben Geschichte

Am Beginn unserer Reise sollten wir einige Grundtatsachen über lebende Systeme rekapitulieren. Am Anfang jeder Nahrungskette stehen Bakterien oder Pflanzen, die aus Wasserstoff (H_2) und Kohlendioxid (CO_2) organische Verbindungen herstellen. Kohlendioxid ist in der Luft vorhanden, während Wasserstoff erst gewonnen werden muss. Manche Organismen entziehen ihn Schwefelwasserstoff-Verbindungen (H_2S oder HS^-), andere spalten bei der Photosynthese Wassermoleküle mit Hilfe des Sonnenlichts. Die übrigen Lebensformen hängen alle von diesen Zellen ab, die aus Wasserstoff und Kohlendioxid organische Substanzen synthetisieren: Sie spannen sie für sich ein oder fressen sie.

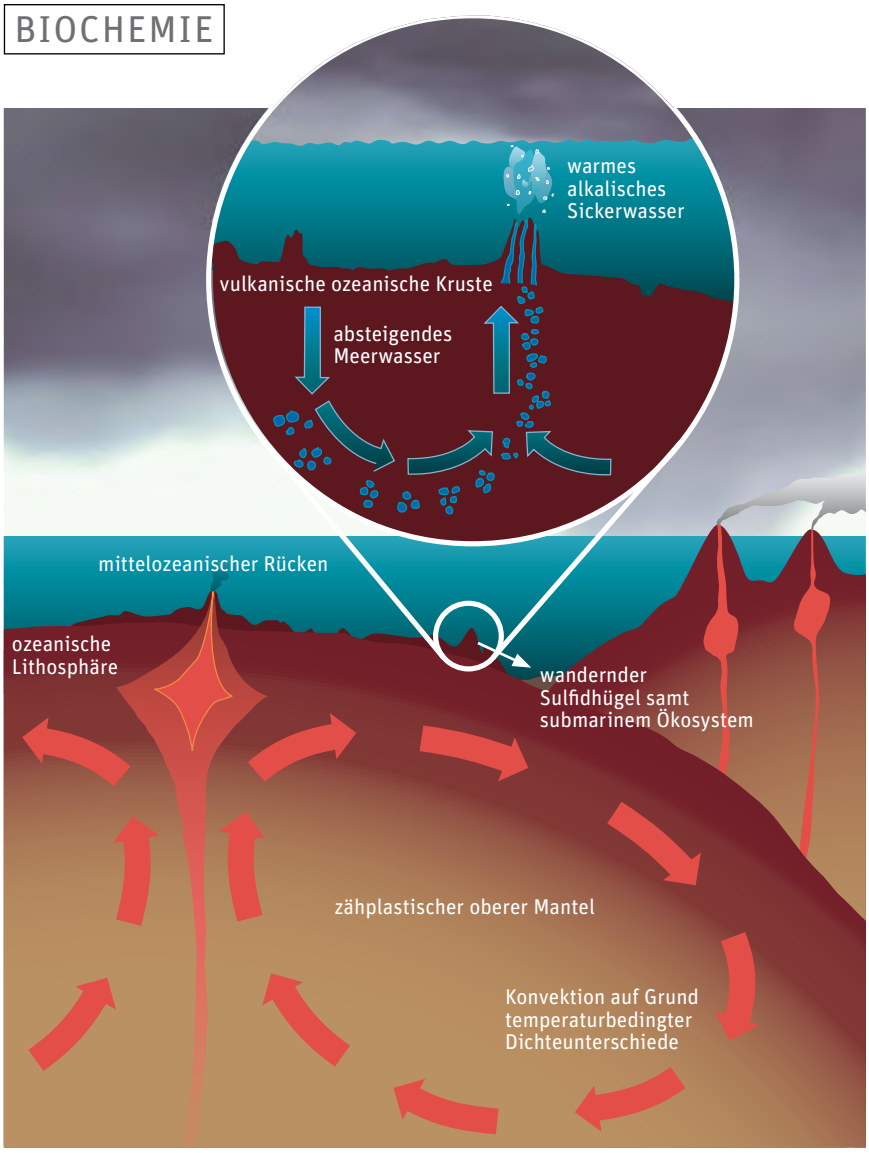
In der Frühzeit der Erde bestand die Atmosphäre fast völlig aus Kohlendioxid, weshalb sich auch in den Ozeanen viel von dem Gas gelöst hatte. Zugleich entwich molekularer Wasserstoff aus der Erdkruste. Dieser hatte eine starke Tendenz, dem Kohlendioxid Sauerstoff zu entziehen und dabei nicht nur Wasser, sondern auch eine Reihe einfacher organischer Verbindungen wie Essigsäure oder Methan zu bilden, die Vorläufermoleküle des Lebens darstellen. H_2 und CO_2 können trotz ihrer großen chemischen Affinität füreinander unter Normalbedingungen jedoch nicht miteinander reagieren. Darin lag ein wesentlicher Grund für die Entstehung von Leben, da es diese Reaktion einerseits als Katalysator überhaupt erst ermöglichte und andererseits ihre Produkte vereinnahmte. Grob schematisch geschah das nach der chemischen Gleichung:

$$2\,H_2 + CO_2 \rightarrow [CH_2O]^{\text{Protoleben}} + H_2O$$

Diese Gleichung unterschlägt allerdings all die anderen Komponenten, die zum Aufbau komplexerer organischer Moleküle nötig sind. Dazu zählen insbesondere Stickstoff (in Form von Ammoniak), Sulfide, Phosphate und – wenn auch nur in Spuren – gewisse Übergangsmetalle wie Eisen, Nickel, Mangan, Kobalt und Zink. Diese Rohmaterialien waren allesamt in den Ozeanen der Frühzeit vorhanden. Besonders reichlich gab es sie in der Nähe hydrothermaler Quellen am Meeresboden, die auf Grund von Konvektionsprozessen heißes, mit gelösten Mineralen gesättigtes Wasser ausstoßen.

Die Gleichung ignoriert außerdem die Nebenprodukte, die anfallen, wenn Lebewesen die Reaktion von Wasserstoff mit Kohlendioxid katalysieren. Selbst ▷

$$\{C_{70}H_{129}O_{65}N_{10}P\,(Fe, Mn, Ni, Co, Zn)\,S\}^{\text{Protoleben}} + \{70H_3C{-}COOH + 219H_2O\}^{\text{Abfall}}$$



Konvektion ist die Wärmekraftmaschine der Erde. Auf Grund temperaturbedingter Dichteunterschiede zirkuliert das Gestein im heißen, zähplastischen Mantel und hält so die Lithosphäre, die starre Außenhaut unseres Planeten, in stetiger Bewegung. An deren Oberfläche wiederum existiert ein analoger Kreislauf, indem Wasser in den Meeresboden eindringt, die Hitze des radioaktiv erwärmten Gesteins aufnimmt, wieder aufsteigt und an Hydrothermalquellen eine reiche Fracht an Elementen in den Ozean entlässt.

▷ einfachste Organismen produzieren eine erstaunliche Menge an Abfall – darunter Sauerstoff. Diese Nebenprodukte sind deshalb auch ein Indiz für die Präsenz von Leben auf anderen Planeten.

Viele Mikroben werden nach dem von ihnen erzeugten Müll benannt. Methanogene oder Acetogene zum Beispiel heißen so, weil sie Methan beziehungsweise Acetat, das Anion der Essigsäure, erzeugen. Letztere waren wahrscheinlich die ersten Organismen überhaupt und bildeten sich an den Rändern hydrothermaler Tiefseequellen, an denen stark alkalische Lösungen austreten. Dafür spricht unter anderem die bei der Acetatbildung freigesetzte Energie, die nach Berechnungen von Everett L. Shock von der Arizona State University beträchtlich ist.

Unten auf der vorhergehenden Doppelseite ist eine kompliziertere Gleichung für die Erzeugung einer Einheit »Protoleben« dargestellt. Darin sind auch die großen Mengen an Essigsäure und Wasser aufgeführt, die als Nebenprodukte entstehen. Als Ausgangsmaterial dient eine gut gewürzte und gesalzene Suppe mit den nötigen Vorläufermolekülen – neben CO_2 und H_2 vor allem Ammoniak, Sulfide und Phosphate.

Der hohe Anteil an Abfall hängt mit der enormen Menge an verbrauchtem Wasserstoff zusammen. Dieser ist gleichsam der Kraftstoff für den Motor des Lebens. Er verwandelt die anderen Vorläufermoleküle in Verbindungen mit höherem Energiegehalt und Ordnungsgrad (Chemiker sprechen von freier Enthalpie und Entropie). Die heutige Biosphäre nutzt dieselbe Maschinerie, obwohl die moderne Photosynthese durch Cyanobakterien, Algen und Pflanzen meilenweit von diesem einfachen Prozess entfernt ist.

Aber wie hat alles angefangen? Um diese Frage zu beantworten, müssen wir uns die Bedingungen auf der frühen Erde vorstellen. Damals drehte sich der Globus schneller um die eigene Achse, sodass ein Tag nur vier bis fünf Stunden dauerte. Der Mond war viel näher, was hohe und häufige Gezeiten sowie Stürme zur Folge hatte. Riesige Meteoriten prasselten auf den Erdball. Trafen sie aufs Meer, verdampften sie die obere Wasserschicht. Beim Einschlag auf dem Land schleuderten sie Staub und Asche in die Luft, die das Sonnenlicht blockierten. Unter solch chaotischen, dauernd wechselnden Bedingungen konnte an der Erdoberfläche kein Leben entstehen. Es gab nur einen geschützten Ort mit reichlich Nährstoffen: die heißen Quellen in der Tiefsee. Hier bestand weder die Gefahr der Austrocknung noch wurde es je zu heiß oder zu kalt, zu sauer oder zu alkalisch. Und hierhin konnte auch die zerstörerische Ultraviolettstrahlung der Sonne nicht vordringen.

Deshalb vermuteten mein Kollege Allan Hall von der Universität Glasgow und ich schon Ende der 1980er Jahre die Geburtsstätte des Lebens am Grund des Meeres, das im Hadaikum – dem Zeitalter vor 4,57 bis 3,8 Milliarden Jahren – noch wesentlich saurer war als heute. Die Gradienten von Temperatur und pH-Wert im Umkreis alkalischer hydrothermaler Quellen könnten die nötige Energie geliefert und die im Quellwasser gelösten Minerale den stetigen Nachschub an chemischen Nährstoffen sichergestellt haben. Dadurch entstand ein geregelter kontinuierlicher Durchflussreaktor, wie Ingenieure sagen würden. Die im Quellwasser gelösten Verbindungen dürften, so unsere Theorie, bei der Reaktion mit den Chemikalien im kühleren Meerwasser ausgefallen sein, sodass sich Berge von Ausscheidungen aus Karbonaten, Kieselerde, Ton und Eisennickelsulfiden rund um solche heißen Quellen auftürmten.

Im Jahr 2000 entdeckte ein Team unter Leitung der Ozeanografin Deborah S. Kelley an der Universität von Washington in Seattle am Mittelatlan-

tischen Rücken 800 Meter unter dem Meeresspiegel Strukturen, wie Hall und ich sie seinerzeit vorhergesagt hatten. Einige der weißlichen Karbonat-Türme erreichten eine Höhe von sechzig Metern, sodass sich die Forscher wie in einer »versunkenen Stadt« vorkamen. Das Quellwasser hat dort eine konstante Temperatur um neunzig Grad Celsius – viel weniger als bei den hydrothermalen Quellen am Ostpazifischen Rücken, den so genannten Schwarzen Rauchern, die bis 400 Grad heiße Lösungen ausstoßen.

Bei dieser Temperatur würde Blei schmelzen und jegliches organische Polymer verkohlen. Aus diesem Grund kommen die Schwarzen Raucher wohl kaum als Brutstätten des Lebens in Frage. Allerdings waren sie wichtige Lieferanten von Metall- und Phosphat-Ionen.

Natürliche chemische Gärten

Die Idee zur Theorie der alkalischen Quellen verdankte ich übrigens meinem Sohn Andy. Eines Abends unterhielt ich ihn damit, dass ich »chemische Gärten« erzeugte. Sie bestehen aus langen Siliziumdioxid-Fingern, die sich bilden, wenn man in eine alkalische Natriumsilikat-Lösung hydratisierte Salze aus einer starken Säure und einer schwachen Base (wie Kobaltchlorid $CoCl_2 \cdot 6H_2O$) wirft. Das Ergebnis sieht sehr hübsch aus. Aber am nächsten Abend begann Andy zu meiner Bestürzung, die Finger zu zerbrechen. Er verschanzte sich im Badezimmer und überhörte meine Aufforderung, zum Essen zu kommen. Stattdessen verkündete er hinter der verschlossenen Tür: »Papa, die Dinger sind ja hohl!«

Hohl! Plötzlich verstand ich die rätselhaften mineralischen Formen, die ich in 350 Millionen Jahre altem Gestein aus einer Blei-Zink-Mine in Irland gesehen hatte. Diese Säulen, Schlote und Blasen aus Eisensulfid mussten einst natürliche chemische Gärten gewesen sein. Als ich am nächsten Tag mit Allan Hall über mein Aha-Erlebnis sprach, kam uns der Gedanke, dass solche Strukturen als anorganische Membranen für die ersten Zellen fungiert haben könnten. Sie waren offenbar entstanden, als warmes Wasser aus alkalischen Quellen mit hohem Gehalt an Sulfid-Ionen auf saures Meerwasser mit Eisen aus den Schwarzen Rauchern traf. Wir eilten ins Labor und schafften es ziemlich schnell, die fossilen Gebilde durch Simulation der damaligen Bedingungen zu reproduzieren.

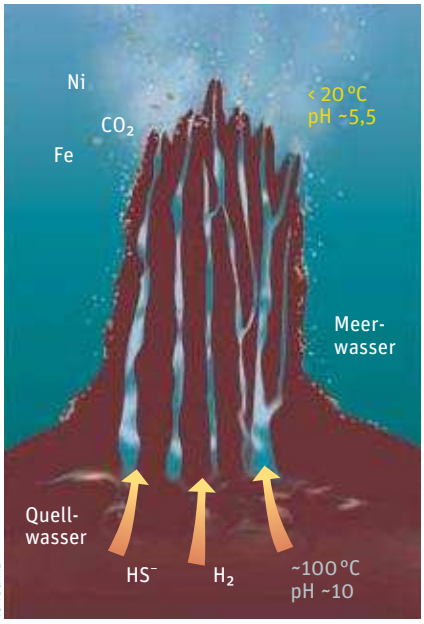
Wie unsere Experimente zeigten, bildet der Eisensulfidniederschlag zunächst ein Gel mit Poren und Blasen als abgeschlossenen Behältern, in denen chemische Reaktionen stattfinden können. Die Membranen dürften dafür gesorgt haben, dass organische Moleküle in den Hohlräumen gefangen blieben und sich anreicherten. Wegen des geringen Volumens der Blasen könnten auch weniger begünstigte oder komplexere Reaktionen abgelaufen sein. Aus ganz ähnlichen Gründen umschließt heute jede autonome Lebensform ihr Inneres mit einer Membran.

In die Protozellen dürften durch die dünnen Membranen aus dem sauren Meerwasser mit konstanter Rate H^+-Ionen (Protonen) eingeströmt sein. Dieser Fluss ist als protonenmotorische Kraft bekannt und leistet heute für lebende Zellen nützliche Arbeit. Diese Zellen müssen jedoch ihren eigenen Gradienten schaffen, indem sie H^+-Ionen hinauspumpen.

Im Labor erwiesen sich solche Eisensulfidmembranen zugleich als semipermeabel. Größere, »klebrige« organische Produkte (Amino-, Fett- und Nukleinsäuren sowie Zuckermoleküle) blieben in den Blasen und Poren eingeschlossen, während kleine, unreaktive Stoffe (Essigsäure, Methan) entweichen konnten.

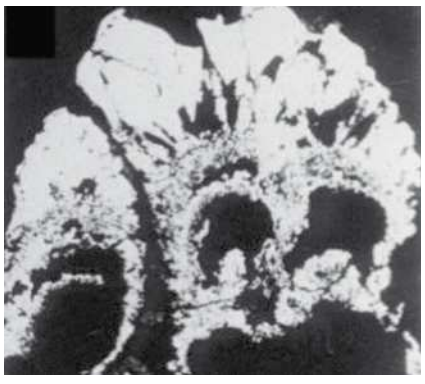
Aber wie entstanden überhaupt die organischen Moleküle in den Protozellen? Selbst die einfachsten Reaktionen konnten nicht von allein ablaufen. Wie erwähnt, sind Wasserstoff und Kohlendioxid nebeneinander sehr stabil. Ein Katalysator musste her. Nur welcher?

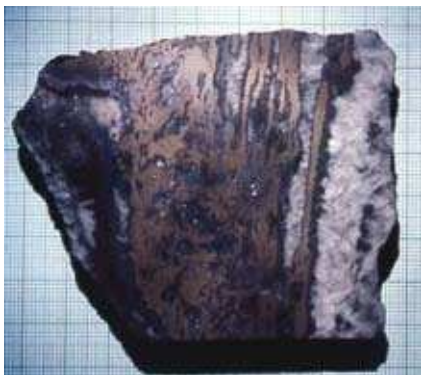
Als Allan Hall und ich darüber spekulierten, kamen wir auf das Mineral Greigit, das bei unseren Membranexperimenten mit ausfiel. Obwohl es in Lehrbüchern gewöhnlich als reines Eisensulfid (Fe_3S_4) bezeichnet wird, enthält es in Wahrheit meist größere Mengen Nickel (Fe_3NiS_8). Aus meinen Lehrlingstagen in der chemischen Industrie wusste ich: Nickel kann als hervorragender Katalysator bei organischen Synthesen wirken. Und so schien mir denkbar, dass es einst auch ▷



TOM DUNNE

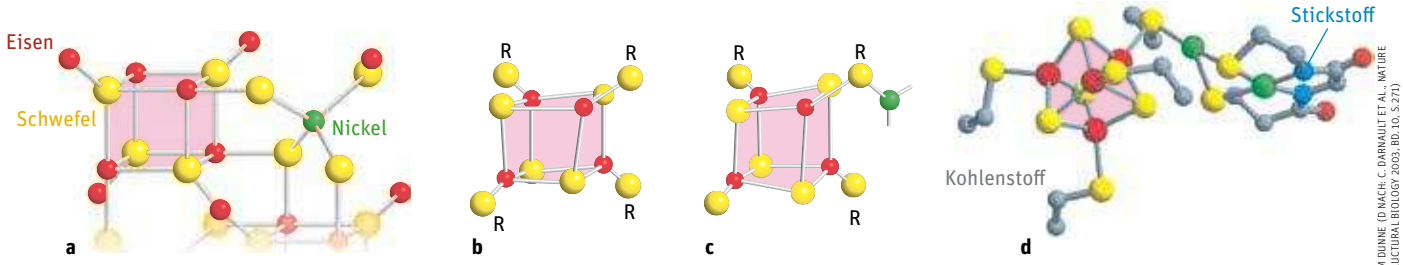
Hydrothermale Mineralhügel spielten eine Schlüsselrolle beim Ursprung des Lebens. Dort traten alkalische Fluide aus, die Wasserstoff, Sulfide und Ammoniak mitführten. Das umgebende Wasser war kühl, sauer und reich an Kohlendioxid; zudem enthielt es metallische Spurenelemente.





BEIDE FOTOS: MICHAEL RUSSELL

Fossilien belegen, dass es einst hydrothermale Quellen und zugehörige Mineralhügel in der Tiefsee gab. Aus der Tynagh-Mine in Galway County (Irland) stammen 350 Millionen Jahre alte Proben von Pyrit (FeS_2) in Form von Blasen (links) und Türmen (rechts).



TOM DUNNE (D NACH: C. DARNAULT ET AL., NATURE STRUCTURAL BIOLOGY 2003, BD. 10, S. 271)

Die würfelförmige Anordnung der Atome im Mineral Greigit (a) ähnelt derjenigen in der Thiocuban-Einheit (b) des Enzyms Ferredoxin und im cuboidalen Komplex (c, schematisch dargestellt) im aktiven Zentrum des Enzyms Acetyl-CoA-Synthase/Kohlenmonoxid-Dehydrogenase. Die Röntgen-Kristallstruktur (d) für den so genannten A-Cluster des letztgenannten Enzyms bestätigt diese Ähnlichkeit. R steht für einen organischen Rest.

▷ die Reaktion zwischen Wasserstoff, der an der Hydrothermalquelle mit austrat, und dem im sauren Meerwasser gelösten Kohlendioxid erleichterte. Wenn aber Greigit tatsächlich den ersten aufbauenden Stoffwechselvorgang vermittelte, sollten Relikte dieser Herkunft in den heutigen Katalysatoren des Lebens zu finden sein: den Enzymen.

Ganz neu war die Idee mit den Eisensulfiden nicht. Richard V. Eck vom National Cancer Institute in Bethesda (Maryland) und Margaret O. Dayhoff von der Georgetown-Universität in der US-Hauptstadt Washington hatten 1966 schon die Vermutung geäußert, dass die ältesten Proteine leicht verzerrte Würfel enthielten, an deren Ecken abwechselnd Eisen- und Schwefelatome sitzen. Solche so genannten Cubane sind feste Bestandteile von Proteinen wie Ferredoxin, mit denen Zellen Elektronen durch eine Membran oder zu einer biosynthetisch aktiven Stelle befördern. In Ecks und Dayhoffs hypothetischer Brücke zwischen Cubanen und ältesten Stoffwechselreaktionen klang das Diktum des berühmten ungarischen Biochemikers und Medizin-Nobelpreisträgers (1937) Albert Szent-Györgyi nach: »Leben ist nur ein Elektron auf der Suche nach einem Ruheplatz.« Kohlendioxid kann dieser Ruheplatz sein: Indem es Elektronen aufnimmt, wird es zu organischen Molekülen reduziert.

Im Jahr 1999 zeigten Juan-Carlos Fontecilla-Camps vom Institut für Strukturelle Biologie in Grenoble und Stephen W. Ragsdale von der Universität von Nebraska in Lincoln, dass Enzyme mit Eisennickelsulfiden nicht nur Kohlendioxid zu Kohlenmonoxid (CO) und Wasser reduzieren, sondern zugleich die Bildung von Acetat und noch mehr Wasser katalysieren können – also genau die Reaktionen, die wir suchten. Das aktive Zentrum dieser Enzyme mit Doppelfunktion, die folglich zum einen als Kohlendioxid-Dehydrogenasen und zum anderen als Acetyl-Coenzym-A-Synthasen bekannt sind, erinnert in seiner Formel (Fe_4NiS_5) und cubanartigen Struktur stark an Greigit, das bei maximalem Nickelgehalt die schon erwähnte Formel Fe_5NiS_8 hat. Das sprach für unsere Theorie, wonach anorganische Eisennickelsulfide das Leben auf den Weg gebracht haben – ohne sie allerdings zu beweisen.

Ein weiterer Baustein im Puzzle tauchte 1997 auf. Damals zeigten Claudia Huber von der Technischen Universität München und der Chemiker und Patentanwalt Günter Wächtershäuser, dass ein »frisch ausgefällter wässriger Schlamm aus gemeinsam gefällten« Eisen- und Nickelsulfiden (vermutlich Greigit) in Gegenwart von Kohlenmonoxid (leider nicht Kohlendioxid) Acetat produzieren kann. Außerdem katalysiert er die Bildung von Methylsulfid (CH_3SH), diesmal aus CO_2. Mein Mitarbeiter William Martin an der Universität Düsseldorf und ich haben ein Szenario entworfen, wie aus Acetat mit der Energie, die bei seiner Bildung frei wird, einst weitere organische Moleküle entstehen konnten.

Die ersten Enzyme

Schon 1992 hatten Remy J.C. Hennet von der geowissenschaftlichen Firma S. S. Papadopoulos & Associates, Nils C. Holm von der Universität Stockholm und Michael H. Engel von der Universität von Oklahoma in Norman mit Eisensulfiden und Tonerden als Katalysatoren aus elementaren Grundstoffen einfache Aminosäuren wie Glycin erzeugt. Vor drei Jahren schließlich gelang es Luke Leman und M. Reza Chadin vom Scripps Research Institute in La Jolla (Kalifornien) gemeinsam mit Leslie Orgel vom Salk Institute for Biological Studies in San Diego (Kalifornien), mit Hilfe von Carbonylsulfid (COS) und Metallsulfid-Katalysatoren Aminosäureketten – also Peptide – herzustellen. Nun fehlt nur noch ein Glied in dieser induktiven Herleitung: der Nachweis, dass sich auf anorganischem Weg CO_2 zu CO reduzieren lässt.

Aber auch ohne dieses letzte Puzzlestück gibt es inzwischen genügend Hinweise darauf, wie Eisen-(Nickel-)Sulfide organische Synthesen katalysiert und selektiv bestimmte Reaktionsprodukte eingeschlossen haben könnten. Vermutlich nahmen einige Peptide im Lauf der Zeit Eisen-Schwefel-Cluster aus ihrer Umgebung in sich auf. Durch diesen Einbau entstanden die Vorläufer der heutigen Ferredoxine. E. James Milner-White von der Universität Glasgow und ich haben zumindest theoretisch gezeigt, dass sich eine Kette einfacher Aminosäuren um einen Eisensulfid-Cluster wickeln und so im Sinn von Eck und Dayhoff ein primitives Enzym bilden könnte.

Wahrscheinlich haben Peptide aber nicht nur Katalysatoren aus der Umgebung aufgenommen, sondern auch die Eisensulfid-Wände der sie umschließenden Blasen ausgekleidet. Und da sie im Allgemeinen unlöslich sind, übernahm dieser Proteinfilm möglicherweise allmählich die Rolle einer Zellwand oder -membran. So waren die Blasen mit selbstreplizierenden Molekülen nicht mehr an ihre Brutstätten an den hydrothermalen Quellen gebunden und konnten schließlich als kleine Kugeln im Wasser frei umherschweben.

Beim Wechsel von der anorganischen zur organischen Chemie wurde wohl auch der primitive Stoffwechsel effizienter. Allerdings dürften die komplexesten chemischen Reaktionen immer noch recht willkürlich abgelaufen sein. Schließlich fehlte jegliche Anleitung zur Synthese von Makromolekülen mit bestimmten Eigenschaften. Deshalb konnten sich zufällige Verbesserungen von Molekülbau und -funktion kaum auf Dauer halten oder gar durchsetzen. Damit eine Dar-

win'sche Evolution in Gang kam, musste es eine Art von natürlicher Auslese geben. Die aber setzt eine genetische Steuerung voraus, und sei sie noch so grob.

Als Träger der Erbinformation fungieren heute die Ribonukleinsäure (RNA) und die Desoxyribonukleinsäure (DNA). Das aber sind keineswegs einfache Moleküle. So konnten Chemiker zwar die Synthese von Proteinen aus einfachsten Vorläufermolekülen im Labor nachvollziehen, aber bei Nukleinsäure-Polymeren schlugen ähnliche Versuche fehl. Immerhin waren die Ausgangsstoffe für RNA, die wahrscheinlich als Erste entstand, im hadäischen Ozean reichlich vorhanden: Phosphate aus hydrothermalen Quellen, der Zucker Ribose und einige jener stickstoffhaltigen Basen (vor allem Adenin), die sich aus einfachen Vorläufern gebildet hatten. Verknüpft man Adenin, Ribose und eine Phosphatgruppe, ergibt sich Adenosinmonophosphat – einer der Bausteine von RNA.

Ein einzelnes solches RNA-Nukleotid kann jedoch ebenso wenig einen Bauplan für ein Protein beinhalten wie ein einzelner Buchstabe eine sinnvolle Aussage. Das ist das Problem. Die RNA muss deshalb ursprünglich eine andere vorteilhafte Rolle in der noch nicht völlig lebendigen Zelle gehabt haben, bevor es Gene gab. Einmal etabliert, konnte ein RNA-Code dann zusätzlich zur Informationsspeicherung dienen. Aber worin bestand die ursprüngliche Aufgabe der RNA?

Ein Teil der Antwort steckt vermutlich in Adenosintriphosphat (ATP), das als universeller Energieträger in der lebenden Zelle wirkt. Menschen erzeugen davon jeden Tag mehr als die Hälfte ihres Körpergewichts. Zur Energiegewinnung wird eine Phosphatbindung gebrochen, sodass Adenosindiphosphat entsteht. Die Abspaltung eines weiteren Phosphatrests liefert schließlich wieder Adenosinmonophosphat, das sich zu einem RNA-Polymer verketten kann.

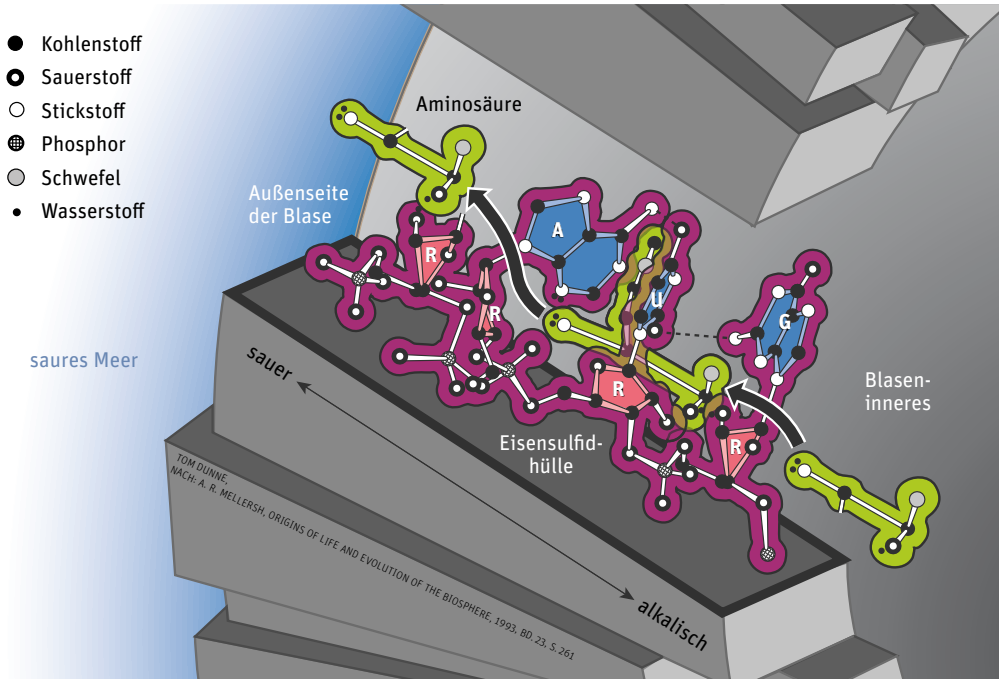
Wie der genetische Code aufkam

Eine solche Kette hat womöglich eine weitere wichtige Rolle gespielt. Nach Anthony R. Mellersh von der Universität Derby in Großbritannien war sie vermutlich im Stande, sich Aminosäuren zu schnappen und diese miteinander zu verkuppeln. Bis zu einem gewissem Grad geschieht das sogar spezifisch; denn die Abfolge der Basen in einem RNA-Polymer kann eine Vorliebe für bestimmte Aminosäure-Seitenketten bewirken. Das passt zu einem Szenario, das Carl R. Woese von der Universität von Illinois in Urbana-Champaign schon 1967 entwarf. Demnach vermittelten die Ur-Nukleinsäuren anfangs den Zusammenbau eines Proteins über die direkte Paarung eines Kodeworts – eines Tripletts aus drei nebeneinanderliegenden Basen – mit einer Aminosäure. Die Spezifizität beruhte dabei auf der unterschiedlichen Affinität von gewissen solchen Codons zu einzelnen Aminosäuren.

In modernen Organismen haben spezielle Moleküle, Transfer-RNAs genannt, diese Aufgabe übernommen. Sie heften spezifisch eine bestimmte Aminosäure an das betreffende Codon in einem RNA-Strang. Dabei schimmert die ursprüngliche Affinität jedoch noch durch. So ziehen, wie Mellersh herausfand, RNA-Codons mit Uracil (U) als zentraler Base tendenziell Aminosäuren mit hydrophoben Seitenketten an, während solche mit Adenin (A) in der Mitte hydrophile, geladene oder polare Aminosäuren favorisieren. Diese Unterschiede machen die Art grober Selektion aus, die Woese vorschwebte. Mit seinem Kollegen Allan Shaun Wilkinson, jetzt bei der Firma QinetiQ Nanostructured Silicon Sensors, zeigte Mellersh, dass Polyadenosin zum Beispiel aus einer verdünnten wässrigen Lösung von Aminosäuren Lysin auswählt. Tatsächlich kodiert »AAA« auch heute noch Lysin.

Shelley Copley von der Universität von Colorado in Boulder, Eric Smith vom Santa-Fe-Institut und Harold Morowitz von der George-Mason-Universität in Fairfax (Virginia) gehen noch einen Schritt weiter: Ihrer Ansicht nach wählten Nukleotide nicht nur anderswo gebildete Aminosäuren aus, sondern stellten sie sogar selbst her. Morowitz nutzte Nukleotid-Paare für diesen chemischen Trick, aber Triplett-Codons sollten ihn genauso beherrschen.

In diesem Szenario bilden Minerale (vielleicht Sulfide) die Stützstruktur für RNA-Schablonen, die Aminosäuren erzeugen oder auswählen und sie dann zu Peptiden zusammenfügen. Die kurzen Proteine sammeln sich im Innern der semipermeablen Eisensulfid-Blasen an. Teils könnten sie ausgefällte Sulfid-Cluster umhüllen, teils ein nichtmineralisches Substrat für die Polymerisierung anderer RNAs abgeben. Die unbewegliche RNA-Schablone wiederholt den Vorgang. Diese Arbeitsteilung ist ein irreversibler erster Schritt hin zur Evolution einer Protozelle. ▷



Kurze Stücke immobilisierter RNA, die sich auf einer mineralisierten Eisensulfid-Oberfläche (grau) gebildet haben, können als Schablonen für die Synthese von Peptiden fungieren. Die RNA-Sequenz bestimmt dabei, welche Aminosäure bevorzugt angelagert wird. Hier greift sich ein RNA-Triplett (purpurfarben) aus Adenosin, Uridin und Guanosin (A, U und G, blau) die Aminosäure Methionin (grünes Molekül in der Mitte) und bietet deren nukleophile Aminogruppe der elektrophilen Thiocarbonylgruppe einer benachbarten Aminosäure (grünes Molekül links) an. Saures Wasser, das von der Meerseite her eindringt, löst eine auf diese Weise Stück für Stück aufgebaute Peptidkette von der anorganischen Membran ab.

Für eine solche RNA-Welt gelten jedoch erhebliche Einschränkungen. So ist RNA fragil und hält Temperaturen oberhalb von 50 Grad Celsius nicht lange aus. Deshalb übernahm schließlich die robuste, weniger reaktive DNA viele ihrer Aufgaben.

So produktiv die Acetatbildung für die ersten Organismen gewesen sein muss, gibt es andere Wege zur Umsetzung von CO_2 mit H_2, die mehr Energie liefern. Dazu gehört etwa die Methansynthese nach folgender Gleichung:

$$2\,H_2 + CO_2 \rightarrow CH_4 + 2\,H_2O$$

Aber diese Reaktion ist noch stärker gehemmt als die Acetatbildung. Es existieren Barrieren, die mit Katalysatoren umgangen oder mit thermischer Energie übersprungen werden müssen. Doch gab es schließlich Organismen, die diesen Schritt geschafft haben: die Proto-Methanogene. Sie markieren, wie Martin und ich vermuten, die erste und bedeutsamste Gabelung im Evolutionsbaum.

Unserer Meinung nach kam es zu einer raschen Spezialisierung dieser beiden Kohlendioxid-Assimilatoren. Dabei entstanden aus den Proto-Acetogenen und Proto-Methanogenen mit der Zeit die Urreiche der Bakterien und Archäen (die erst neuerdings als eigener Stamm erkannt wurden). Aber wie schafften sie den Absprung von ihrer hydrothermalen Brutstätte?

Der aufgewühlte Ozean jener Zeit war kein angenehmer Ort. Es gab dort kaum Nährstoffe und in die höheren Wasserschichten drang ultraviolette Strahlung vor. Organismen, die das Pech hatten, vom ausströmenden Quellwasser ins offene Meer geschwemmt zu werden, gingen ohne ihre gewohnte Wasserstoffquelle rasch zu Grunde. Der einzige sichere Weg vom hydrothermalen Hügel weg führte abwärts – durch den Meeresboden in die warmen Sedimente und durchlässigen Basalte darunter. Dort könnten vereinzelte Organismen mit einer stetigen, wenn auch mageren Zufuhr an Wasserstoff und Kohlendioxid überlebt haben. So entwickelte sich eine Biosphäre in der Erdkruste am Grund der Ozeane.

Die ozeanischen Krustenplatten aber bewegten sich auf Grund der Konvektion im Erdmantel und schoben sich unter benachbarte Kontinente. Bei dieser Subduktion wirkt die Kontinentalplatte wie ein Hobel, der den oberen Teil des Meeresbodens abschabt und zu einem Keil vor sich auftürmt. So entstehen an den Küsten Flachwasserbereiche. Den Bakterienkolonien, die mit der Plattendrift im Verlauf von Jahrmillionen in solche Regionen gelangten, müssen die Bedingungen dort optimal erschienen sein: Das Meer ist tief genug, um die schädliche UV-Strahlung abzuhalten, aber dennoch so seicht, dass das längerwellige Sonnenlicht bis zum Boden gelangt und für die Produktion von organischen Molekülen nutzbar ist. Zu diesem Zweck entwickelten einige Bakterien schließlich die Sauerstoff-Photosynthese.

Wie das Licht ins Spiel kam

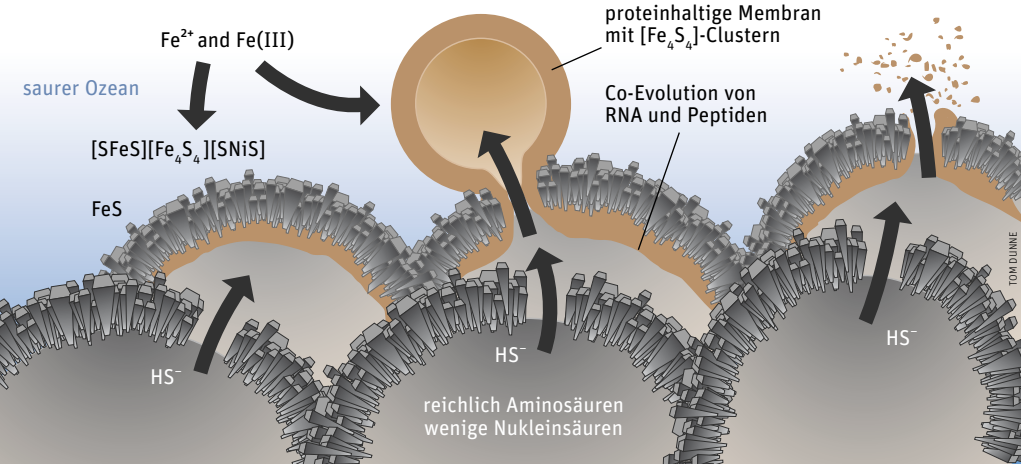
Damit war ein radikaler Wechsel der Nahrungsquelle verbunden. Ursprünglich nutzte das entstehende Leben Wasserstoff, der tief in der Erde durch chemische Reaktionen aus Wasser entstand. Dessen Menge war jedoch begrenzt. Nun griffen die Organismen auf das allgegenwärtige Wasser zurück und entzogen ihm mit Hilfe der Sonnenenergie den Wasserstoff. Der übrig bleibende Sauerstoff wurde als Abfall ausgeschieden und reicherte sich schließlich in der Atmosphäre an. Der Charakter unseres Planeten wurde damit unwiderruflich verändert.

Wahrscheinlich ebnete wie bei den ersten Stoffwechselprozessen ein mineralischer Katalysator den Weg zur Photosynthese. In diesem Fall war es allerdings kein Eisennickelsulfid, sondern ein Mangancalciumoxid ($Mn_4CaO_{\geq 4}$), das gleichfalls eine Cubanstruktur hat. Im Unterschied zu Eisen sind Manganatome wegen ihrer größeren Zahl an Valenzelektronen ziemlich strahlungsresistent. Wahrscheinlich waren frühe Organismen, wenn sie manganhaltige Verbindungen aufnahmen, unempfindlicher gegen Sonnenlicht. Ausgehend von dieser Schutzfunktion könnte das Element dann die führende Rolle bei der Entwicklung der Sauerstoff-Photosynthese übernommen haben.

Eines der Minerale, die konkret dafür in Frage kommen, ist Rancieit ($Mn_4CaO_9 \cdot 3H_2O$). Seine Formel ähnelt derjenigen des Sauerstoff entwickelnden Zentrums (OEC) in jenem Enzym, das bei der Photosynthese die Spaltung des Wassers katalysiert. Allerdings hat es nicht dieselbe Struktur, wie kürzlich James Barber und Kollegen am Imperial College London nachwiesen. Bindungsverhältnisse und räumliche Anordnung der Atome im OEC ähneln laut Kenneth H. Sauer und Vittal K. Yachandra am Lawrence Berkeley National Laboratory (Kalifornien) eher denen in einem manganhaltigen Mineral namens Hollandit ($Mn_8[Ba,K]_{1-2}O_{16}$]. Wie lassen sich diese Ergebnisse in Einklang miteinander bringen?

Rancieit und Hollandit sind beide unter Bedingungen, wie sie dicht unter der Oberfläche des hadäischen Ozeans herrschten, relativ stabil. Außerdem enthalten beide gegeneinander austauschbare Atomgruppierungen. So könnte sich ein Rancieit-Cluster in der Nähe eine Bakteriums in eine hollanditartige Form umgewandelt haben.

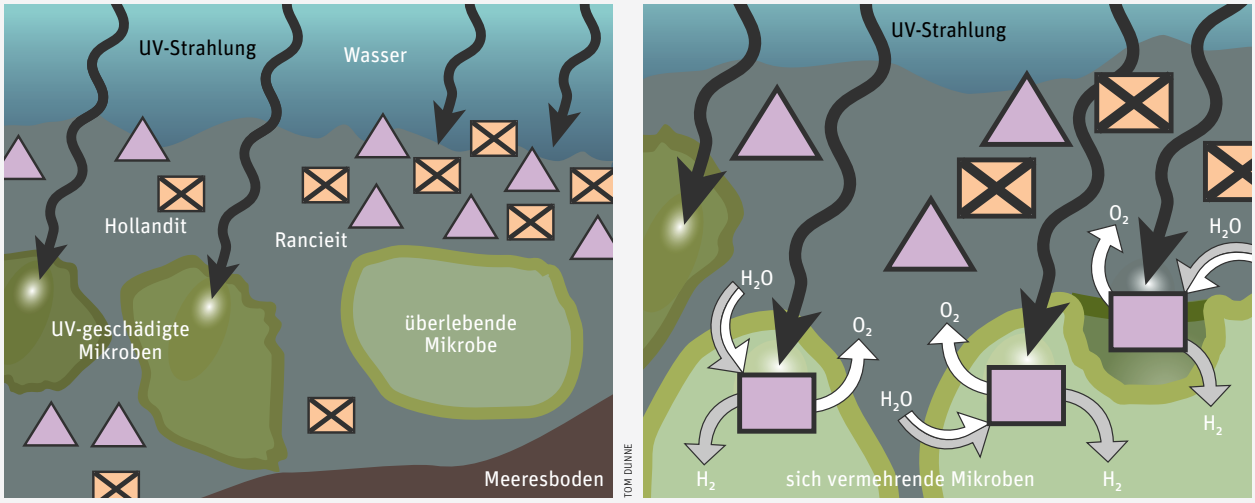
Schon ein Minimum an genetischer Kontrolle reichte dann vermutlich aus, damit ein Protein entstand, das diesen



Die in Metallsulfidblasen an Tiefseequellen gebildeten organischen Moleküle kollidierten miteinander, verbanden sich teilweise, wurden dadurch immer komplexer und reicherten sich an. Als Folge davon kleideten wahrscheinlich klebrige Peptidniederschläge die Innenseite von Blasen mit besonders effizienter Peptidsynthese aus. Diese Überzüge könnten irgendwann Membranfunktion übernommen haben.

Der Ursprung der Photosynthese

Durch die Plattendrift gelangten Teile des Meeresbodens im Verlauf von Jahrmillionen in seichtere Gewässer. Dabei beförderten sie Mikroben, die an heißen Quellen in der lichtlosen Tiefsee entstanden waren, in ein Milieu mit neuen Herausforderungen und Möglichkeiten dank der dort vorhandenen Sonnenstrahlung. Die manganhaltigen Minerale Hollandit (orange Rechtecke) und Rancieit (lila Dreiecke) schirmten wahrscheinlich Organismen in ihrer Nähe gegen die zerstörerische ultraviolette Strahlung ab (links). Am besten geschützt waren Mikroben, welche die UV-Absorber an ihre Oberfläche binden konnten. Auf engem Raum zusammengedrängt haben die beiden Minerale dann vielleicht Bestandteile ausgetauscht, wodurch Rancieit möglicherweise ein typisches Strukturelement von Hollandit übernahm (purpurne Rechtecke, rechts). Dadurch könnte es die Fähigkeit erlangt haben, nicht nur die Sonnenstrahlen abzublocken, sondern mit deren Hilfe auch Wassermoleküle zu spalten. Der dabei freigesetzte Wasserstoff war ein gefundenes Fressen für jede Mikrobe in der Nähe, während der Sauerstoff als Abfall entwich. Schließlich nahm die Zelle das katalytische Molekül in sich auf (rechte Grafik, rechts unten), um allein davon zu profitieren.



Cluster anlagerte und so einen Komplex bildete, der bei Lichteinfall Wasserstoff entwickelte. Die betreffende Zelle und ihre Nachbarn wären gleichsam über Nacht glückliche Nutznießer einer neuen Rohstoff- und Energiequelle für die Biosynthese geworden. Der Einbau des photosynthetischen Molekülkomplexes in eine Membran gestaltete den Vorgang noch effizienter. Die Forschungsgruppen von John F. Allen von der Queen Mary University in London und Wolfgang Nitschke vom Institut für Strukturbiologie und Mikrobiologie in Marseille haben im Detail dargelegt, wie auf diesem Weg die Cyanobakterien entstanden. Irgendwann verschlangen andere Zellen die ersten photosynthetischen Mikroben und wandelten sie in Chloroplasten um. Wirkungsmechanismus und Struktur des [Mn_4Ca]-Zentrums blieben bis zu den heutigen Grünpflanzen erhalten.

Wie von Sauerstoff ausgefällte Eisenoxidablagerungen in alten geologischen Schichten belegen, entwickelte sich die Photosynthese schon vor mehr als 3,8 Milliarden Jahren. Sie war die letzte große Errungenschaft des Lebens im Bereich des aufbauenden Stoffwechsels. Dessen grundlegende Mechanismen haben sich seitdem nicht mehr verändert, auch wenn die Präsenz von freiem Sauerstoff in Luft und Wasser während der letzten zwei Milliarden Jahre immer komplexere Zellfunktionen ermöglichte. Wir Menschen sind ein Produkt dieser Entwicklung, das sich von den anderen nur durch sein semireflexives Bewusstsein unterscheidet.

Das Wissen darum, wie das Leben begann und wie es funktioniert, sollte uns zur Einsicht bringen, dass wir für gutes Haushalten auf unserem Heimatplaneten verantwortlich sind. Aber da liegt der Haken: Wir leben an der Grenze zwischen Ordnung und Chaos, weitab von einem kontrollierten Gleichgewicht, und der Imperativ des Lebens ermutigt uns, verschwenderisch zu sein und Abfall zu produzieren. Ressourcen schnellstmöglich zu verbrauchen ist natürlich. Aber genau dagegen müssen wir angehen. Wenn uns das Leben weniger geheimnisvoll erscheint und wir es etwas wissender und distanzierter betrachten, sind wir für diese künftige Herausforderung vielleicht besser gerüstet. ◁

Michael Russell ist Nasa Research Fellow am Jet Propulsion Laboratory in Pasadena (Kalifornien). Er studierte an der Universität London Geologie und promovierte an der Universität Durham. Dabei forschte er über die Entstehung von Blei-Zink-Lagerstätten in Irland und erkannte deren Ursprung in 350 Millionen Jahre alten hydrothermalen Quellen. An der Universität Strathclyde (Schottland) beschäftigte er sich dann näher mit diesen Strukturen, was sein Interesse an der Entstehung des Lebens weckte.

© American Scientist
www.americanscientist.org

Autor und Literaturhinweise

A mechanism for the association of amino acids with their codons and the origin of the genetic code. Von S. D. Copley et al. in: Proceedings of the National Academy of Sciences USA, Bd. 102, S. 4442, 2005

Carbonyl sulfide-mediated prebiotic formation of peptides. Von Luke Leman et al. in: Science, Bd. 306, S. 283, 8. 10. 2004

Daddy, where did (PS)I come from? Von F. Bayman et al. in: Biochimica et Biophysica Acta, Bd. 1507, S. 291, 2001

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de/artikel/859006

GEORGE RETSECK

Neue Wege zu sicherer Software

Computerprogramme bilden das Rückgrat unserer Kommunikationstechnik. Sie steuern Handels- und Produktionssysteme, fliegen Flugzeuge und erledigen Bankgeschäfte – nicht selten geplagt von Software-Abstürzen. Mit Hilfe neuer Analysewerkzeuge soll die Software jetzt zuverlässiger und sicherer werden.

Von Daniel Jackson
und Gerhard Samulat

Es sollte das modernste System sein, das je auf Autobahnen Gebühren erfasst – und endete beinahe in einem grandiosen Desaster: das Lkw-Mautsystem von Toll Collect. Drei Firmen von Rang und Namen – DaimlerChrysler, Deutsche Telekom und die französische Cofiroute – gelang es erst mit erheblicher Verspätung, die Anlagen in Betrieb zu setzen – und dann noch nicht einmal mit der versprochenen Funktionalität. Einer der Gründe war eine fehlerhafte Software.

»Die Hardware wurde bereits auf den Straßen installiert, als die Software noch gar nicht zur Verfügung stand«, erläutert Dieter Rombach vom Fraunhofer-Institut für Experimentelles Software Engineering in Kaiserslautern. »Und keiner wusste, ob beides zusammen funktioniert.« Seitdem fordert der Bund vom Betreiberkonsortium Entschädigungen in Milliardenhöhe. Im Büro des Fraunhofer Software-Experten hängt eine Urkunde des amerikanischen Expräsidenten George Bush senior, der ihn für seine Null-Fehler-Software auszeichnete, die Rombach für die Weltraumbehörde Nasa entwickelt hatte. Der Informatiker kann von vielen derartigen Schlampereien berichten, etwa vom Fehlstart der Internetbörse der Nürnberger Bundesagentur für Arbeit: »Sie kostete fast dreimal so viel wie ursprünglich veranschlagt: statt der geplanten 60 Millionen Euro waren es schließlich 170.«

Nur so stark wie ihr schwächstes Glied ist eine Brücke ebenso wie ein Computerprogramm. Heute können Informatiker die Zuverlässigkeit ihrer Software testen.

Die Endabnahme des von der Telekom-Tochter T-Systems gelieferten Computerprogramms musste immer wieder verschoben werden. Auch mehrere Monate nach dem Start der Hartz-IV-Reform arbeitete die Software noch immer fehlerhaft. »Die Reaktionszeit des Systems war mangelhaft, und wenn mehrere Nutzer gleichzeitig damit arbeiten wollten, war es überfordert«, berichtet Rombach.

Täglich zahlen Millionen frustrierter Benutzer den Preis für schlechtes Software-Design. Schwer wiegende Konstruktionsfehler werden oft viel zu spät entdeckt. Meist bemerken Programmierer die Unzulänglichkeiten ihrer Systeme erst, wenn sie den so genannten Quellcode – die Anweisungen, die ein Computer benutzt, um ein Programm auszuführen – bereits nahezu vollständig aufgeschrieben haben. Dann erst stoßen sie auf Ungereimtheiten im Design. Der Grund: Oft ist bereits der Entwurf schlecht durchdacht. Der Code wird dann mehr oder weniger unsystematisch zusammengeflickt. So entsteht nicht selten ein löchriges Stückwerk voll von Ausnahmen.

Und am Ende bitte einen Balkon

»Das ist wie bei einem Architekten, dem zum Schluss noch einfällt, er könne ja hier und da noch einen Balkon anfügen«, mokiert sich Dieter Rombach. »Das ist nicht nur unprofessionell, sondern macht das Gebäude auch nicht stabiler.« In Software-Schmieden wird aber vielfach genau so gearbeitet. »Dann gibt es da noch Kunden, die wenige Tage vor Auslieferung mal eben noch schnell Änderungen verlangen, weil ihnen etwas eingefallen ist.«

Manager, die komplexe Software vermarkten, weisen oft darauf hin, dass ge- ▷

DENVER INTERNATIONAL AIRPORT, CHRIS CARTER

Fast alle schweren Software-Probleme gehen auf konzeptionelle Fehler zurück, die gemacht wurden, bevor das Programm entstand

Ausfall im automatischen Gepäcksystem: Kofferstau am Flughafen Denver

▷ nau das eben gängige Praxis sei – womit sie leider Recht haben. Darüber hinaus fassen Entwickler das Design ihrer Software selten präzise in Worte. Nur bei Computern, die sicherheitsrelevante Aufgaben übernehmen, bei Flugzeugen, Eisenbahnen oder Autos beispielsweise, drängen Kunden auf besondere Zuverlässigkeit.

Eine neue Generation von Analysewerkzeugen soll diese nun generell sicherstellen (siehe Kasten auf S. 90). Ihre Arbeitsweise ähnelt der, die auch Ingenieure zunehmend benutzen, um Computer-Hardware zu testen. Der Entwickler modelliert zunächst einen Software-Entwurf und prüft dann Milliarden möglicher Durchläufe. Dabei sucht er nach Ereignissen, bei denen sich das Programm anders verhält als erwartet. So lassen sich Fehler im Design aufdecken, noch bevor es als Code hinterlegt wird. Wichtiger ist aber, dass auf diese Weise von vornherein ein präziser und stabiler Entwurf entsteht.

Ein Beispiel für solch ein Prüfinstrument ist »Alloy«, das von einer Arbeitsgruppe um einen von uns (Jackson) erdacht wurde. Dieses Werkzeug hat sich bereits als Prüfsoftware für die Flugzeugindustrie als nützlich erwiesen, aber auch für die Telekommunikation, bei Verschlüsselungssystemen sowie bei medizinischen Geräten (siehe Kasten auf S. 89).

Alloy und ähnliche Werkzeuge zum Prüfen von Software-Designs basieren auf einem Vierteljahrhundert Forschung. So lange schon wird nach Wegen gesucht, um mathematisch zu beweisen, ob Computerprogramme korrekt arbeiten. Solchen Beweisen sind prinzipielle Grenzen gesetzt, wie Alan Turing bereits im Jahr 1936 bewies, als er die Erkenntnisse des Mathematikers Kurt Gödel zur prinzipiellen Unvollständigkeit komplexer mathematischer Systeme auf die Informatik übertrug. Für nicht allzu komplexe Systeme ist eine Beweisführung jedoch möglich. Alloy begreift eine Software als ein riesiges Puzzle. Es prüft keine expliziten Programmcodes, sondern nur das Design einer Software. Daher kann niemand garantieren, dass selbst ein geprüfter Algorithmus nicht eventuell doch abstürzt. Dennoch liefert es Informatikern zumindest Anhaltspunkte dafür, dass ihre Programmstrukturen keine konzeptionellen Fehler mehr enthalten.

Drei Fehler pro tausend Zeilen

Kommerzielle Software ist heute üblicherweise meist von gröbsten Fehlern bereinigt, wenngleich Experten schätzen, dass selbst als wichtig eingestufte Programme pro eintausend Zeilen Programmcode zwei bis drei Fehler enthalten. Wenn man bedenkt, dass die Software eines modernen Autos bis zu zehn Millionen Programmzeilen enthält und die des Betriebssystems Windows XP nahezu 40 Millionen, versteht man die Absturzrate. Informatiker testen ihre Programme mit einer Vielzahl von Startbedingungen. Obgleich die Entwickler auf diese Weise zahlreiche Fehler aufdecken, bleiben dennoch oft grundlegende Mängel im Design verborgen. Denn viele Testverfahren sehen den (kranken) Wald vor lauter (morschen) Bäumen nicht.

Was noch schlimmer ist: Nachträglich reparierte Programme werden in der Regel immer komplizierter. Durch Einfügen neuer Codezeilen wächst ihre Komplexität. Damit erhöht sich die Gefahr, dass sich noch mehr Widersprüche einschleichen oder die Effizienz des Programms – trotz Zeit- und Geldaufwand – zunehmend sinkt. »Beim Versuch, es zu

In Kürze

- Trotz zunehmender Bedeutung der Computer in unserem Leben analysieren Entwickler nur selten das **Software-Design** mit dem Ziel, seine Zuverlässigkeit zu sichern. Neue Prüfprogramme wie Alloy sollen dies ändern.
- Alloy kombiniert eine Sprache, mit der sich komplexe Software einfach modellieren lässt, mit einer Analyseeinheit, die **konzeptionelle oder strukturelle Mängel** automatisch aufspüren kann.
- Künftig werden solche Werkzeuge die Entwicklung von Software-Entwürfen so verbessern, dass die **Programme stabil und zuverlässig** arbeiten.

Wie funktioniert das Prüfprogramm Alloy?

Alloy hilft Software-Designern, Fehler in ihren Programmen aufzuspüren. Es stellt sowohl eine einfache Sprache bereit, mit der sich die Programmstruktur klar darstellen lässt, sowie einen automatisierten Analysator, der die riesige Menge möglicher Abläufe nach Gegenbeispielen durchforstet. In dem hier vereinfacht dargestellten Beispiel benutzt ein Anwender Alloy, um das Design eines Dateisystems zu prüfen, das alle Daten sicher in bestimmten Ordnern ablegen soll. So kann er herausfinden, welche Auswirkungen verschiedene Arbeitsgänge auf die Ordnerstruktur haben. Hier wird gezeigt, wie ein Entwickler den Prozess modellieren und testen würde, der einen Ordner von einer Position innerhalb der Ordnerhierarchie an eine andere verschiebt.

1. Schritt: Definiere die Objekte

Der Designer identifiziert die Objekte des Systems – Ordner, Verzeichnisse, Ordnersystem (File System; fs) – und deren Beziehungen untereinander. Für Alloy besteht das Ordnersystem aus drei Komponenten: »Ordner«, »Verzeichnisse« und »Inhalte« (eine Zuordnung, die für jedes Verzeichnis angibt, welche Ordner und Unterverzeichnisse es enthält).

2. Schritt: Modelliere den Prozess

Als Nächstes modelliert der Designer die Bewegung (»move_dir«) eines Ordnersystems (»fs«) zu einem anderen (»fs'«). Die Operation benötigt zwei Verzeichnisse: »d« ist das Verzeichnis, das bewegt wird, sowie »zu«, der Ort, wohin es verschoben wird. Drei Randbedingungen folgen, die den gewünschten Effekt beschreiben. Erstens: Sowohl das bewegte Objekt wie auch der neue Ort sind Verzeichnisse des Ordnersystems. Als Zweites kommt die Essenz der Operation: Sie besagt, dass die Zuordnung im neuen Behältnis die gleiche ist wie im alten – wobei jede Zuordnung bezüglich »d« von einem Verzeichnis entfernt wird und die Zuordnung von »zu« nach »d« hinzugefügt wird. Die dritte Zeile besagt, dass sich sonst nichts ändert.

3. Schritt: Lege die Anforderungen fest

Der Designer formuliert nun eine wichtige Anforderung: Jeder Ordner und jedes Verzeichnis sollen von einer Wurzel aus »erreichbar« sein (einen Pfad haben). Dies wird in Alloy durch eine »Behauptung« aufgezeichnet (genannt »move_OK«), die besagt, dass eine »move«-Operation Ordner oder Verzeichnisse nicht unerreichbar macht.

4. Schritt: Finde die Mängel und repariere sie

Alloy führt die »check move_OK« Befehle aus, indem es alle möglichen Zustände (bis zu einer gewissen Größe) generiert und für jeden prüft, ob die »Behauptung« eingehalten wird. Es simuliert also alle möglichen Verschiebungen, die beim Ablauf des Programms vorkommen können. Alloy findet ein Gegenbeispiel zur Behauptung: ein Verzeichnis, das auf sich selbst verschoben werden kann. Diese Aktion würde das Verzeichnis von einer Wurzel abschneiden und unauffindbar machen. Zur Abhilfe könnte der Programmierer eine neue Randbedingung hinzufügen, die es verbietet, ein Verzeichnis auf sich selbst oder seine Nachfahren zu verschieben.

Alloy Programm

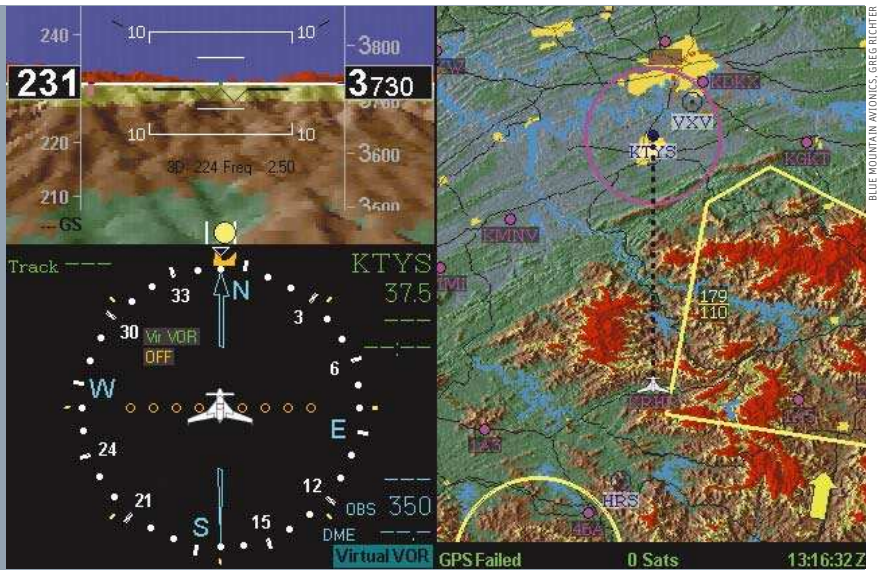
```
module filesystem

abstract sig Object {}
sig File, Dir extends Object {}

sig FS {
  dirs: set Dir, files: set File,
  contains: dirs -> (dirs + files)
  }

pred move-dir (fs, fs': FS, d, to: Dir) {
d + to in fs.dirs
fs'.contains = fs.contains - Dir->d + to->d
fs'.files = fs.files and fs'.dirs = fs.dirs
  }

pred reachable (fs: FS) {
  some roots: fs.dirs | fs.(dirs+files)
  in root.*(fs.contains)
  }

assert move_OK {
  all fs, fs': FS, d, to: Dir |
    reachable (fs) and move_dir
    (fs, fs', d, to) implies reachable (fs')
    }

check move_OK
```

korrigieren, wurden beim alten Betriebssystem OS360 von IBM für jeden behobenen Fehler im Schnitt zwei neue hinzugefügt«, weiß Fraunhofer-Experte Rombach. Das erinnert ein wenig an die Situation, als die mittelalterlichen Gelehrten die ptolemäische Theorie der Planetenbewegung dadurch retten wollten, indem sie bestimmte Hilfsbahnen – so genannte Epizykel – einführten. Als diese nicht ausreichten, fügten sie den Epizykeln eben noch weitere hinzu. Doch trotz aller Anstrengungen konnten sie das Problem nicht lösen. Der Grund: Die Grundannahme der antiken Astronomen stimmte einfach nicht.

Nahezu alle erheblichen Software-Probleme lassen sich daher auf konzeptionelle Schwächen zurückführen, die bereits entstanden, bevor die erste Programmzeile stand. So empfiehlt Rombach der Industrie, für die Analyse des Software-Designs explizit mindestens zwei bis drei Wochen vorzusehen. Denn frühzeitiges Modellieren und Testen kostet nur einen Bruchteil jeder nachträglichen Verifizierung und Korrektur. Rechtzeitige Konzentration auf gutes Design erspart später teure Kopfschmerzen.

Computerprogramme sind im Grunde genommen mathematische Objekte. Deren Werte bestehen aus einzelnen Bits. Im Gegensatz zu vielen mechanischen Anwendungen sind sie also »diskret«. Ein Maschinenbauer kann beispielsweise ein Bauteil mit einer gewissen Kraft testen, und wenn es das aushält, kann er annehmen, dass dies auch bei einer kleineren Belastung gilt. Derartige ▷

Jeder Status, den eine Software einnehmen kann, soll simuliert werden, um so herauszufinden, ob er zu einem Fehler führt



Mit einer Prüfsoftware wurde ein Flugsteuersystem gegen Hackerangriffe gewappnet.

▷ Schlussfolgerungen treffen auf Softwarekomponenten nicht zu. Wenn ein Softwarepaket arbeitet, besagt dies noch lange nichts über die korrekte Funktion des Codes in einer vielleicht ähnlichen, aber doch anderen Umgebung.

Der Absturz der Ariane-5-Rakete auf ihrem Jungfernflug am 4. Juni 1996 über Französisch-Guayana belegt dies. Dort wurde ein Programmpaket verwendet, das bei der Vorgängerrakete Ariane 4 einwandfrei funktioniert hatte. Beim Nachfolgemodell – der Ariane 5 – führte die Umwandlung einer bestimmten ganzen Zahl (integer) in einem Speicher zu einem ungeplanten Überlauf, den der Hauptrechner als Flugdaten interpretierte.

Ein Googol möglicher Zustände

Das Ergebnis: Nach gut 40 Sekunden drohte die Rakete auseinanderzubrechen und musste gesprengt werden. Mit ihr verpufften am Himmel gut sechs Milliarden Euro an Entwicklungskosten.

Weil sich bislang nur wenige Prüfschritte automatisieren ließen, mussten die Informatiker noch sehr viel Arbeit investieren, um die Korrektheit eines Programmcodes sicherzustellen. Dieser Aufwand lohnt sich daher nur in wenigen Fällen, wenn es sich um besonders kritische Software-Elemente handelt, wie etwa bei Algorithmen zur Steuerung von Eisenbahnübergängen. Doch mit den heutigen schnellen Prozessoren können Entwickler nun auch umfangreichere Programme prüfen, beispielsweise für integrierte Schaltungen. Für dieses Verfahren hat sich der Name Modellcheck eingebürgert. Die Idee: Es wird jede mögliche Folge von Zuständen, die das System einnehmen kann, simuliert und getestet, ob eine davon zum Ausfall führt. Für moderne Mikrochips ist die Zahl möglicher Zustände riesig: bis zu 10^{100} (ein Googol) oder mehr. Das übertrifft die Anzahl aller Elementarteilchen im sichtbaren Universum. Einfallsreiche Codierungstechniken, die große Sätze an Softwarezuständen sehr kompakt darstellen und simultan betrachten können, erlauben es dennoch, alle diese Zustände zu überprüfen. Nur bei noch komplexeren Strukturen, die für viele Software-Designs typisch sind, scheitert der Modellcheck noch.

Nun haben Jackson und seine Kollegen mit Alloy einen Ansatz entwickelt, der auf einer ähnlichen Idee beruht. Wie beim Modellcheck betrachtet Alloy alle möglichen Szenarien (wenn auch mit einigen Einschränkungen, um das Problem überschaubar zu halten). Anders als beim Modellcheck untersucht die neue Technik diese aber nicht vollständig der Reihe nach. Stattdessen sucht Alloy nach schlechten Szenarien, die zu Ausfällen führen, indem es jeden möglichen Zu-

Fehlerbeseitigung bei Geräten zur Krebstherapie

Moderne Medizingeräte funktionieren oft nur noch mit umfangreicher Software. Selbst der »Notausschalter« besteht meist aus einem kleinen Programm von einigen tausend Codezeilen, das die Anlage geordnet herunterfährt – wenn es keine Fehler enthält. Hier kommen die neuen Design-Prüfprogramme ins Spiel.

Zusammen mit Krebstherapeuten untersuchten Daniel Jackson und seine Kollegen Design und Funktionalität eines Geräts zur Krebstherapie. Die Prüfsoftware Alloy sollte dabei nach Szenarien fahnden, bei denen es zwischen dem Operator im Hauptkontrollraum und den Therapeuten im Behandlungszimmer zu unerwarteten Resultaten kommt. Das Programm entdeckte, dass sich in einigen Situationen eine bestimmte Halterung bewegte, was nicht vorgesehen war. Das Problem ließ sich einfach lösen, indem sich die Konstrukteure ein Design zum Vorbild nahmen, das Automobilhersteller verwenden, um Sitzpositionen verschiedener Fahrer abzuspeichern. Zwar enthielt das medizinische Gerät viele Sicherungen und die unverhoffte Bewegung wäre den Patienten nicht wirklich gefährlich geworden. Mit den richtigen Abstraktionen aber bereits beim Design wäre die Steuersoftware des Geräts viel einfacher geworden und hätte sich besser bedienen lassen.

LOMA LINDA UNIVERSITY, MEDICAL CENTER

Die korrekte Position des Patienten – von einem Computerprogramm oft millimetergenau gesteuert – ist wichtig, um die Strahlendosis im Gewebe exakt steuern zu können.

stand ohne besondere Reihenfolge automatisch Bit für Bit auffüllt. Alloy betrachtet die Designanalyse also als eine Art Puzzle. Es füllt die Puzzleteile nacheinander auf, bis ein vollständiges Bild entsteht. Entspricht das einem schlechten Szenario, hat Alloy seine Arbeit erledigt.

Fuchs, Gans und ein Sack Mais

Um genauer zu verstehen, wie Alloy Software-Design-Puzzles löst, hilft es, eine bekannte Denksportaufgabe zu betrachten: Ein Mann soll mit einem Fuchs, einer Gans und einem Sack Mais einen Fluss überqueren. Das Boot trägt aber nur ihn und ein weiteres Teil. Würde er den Fuchs mit der Gans allein lassen, würde der Räuber den Vogel verspeisen. Die Gans würde dagegen den Mais fressen. Was tun?

Der Mann bewältigt diese Aufgabe, indem er schrittweise vorgeht: Zuerst bringt er die Gans über den Fluss und kehrt leer zurück; auf der zweiten Tour greift er sich den Fuchs und bringt ihn hinüber, wobei er auf der Rückfahrt die Gans wieder mitnimmt. Bei der dritten Tour packt der Mann den Mais ins Boot, bei der letzten Fahrt holt er die Gans über. Indem er prüft, ob jeder Schritt die Randbedingungen – wer frisst wen oder was? – einhält, überzeugt er sich, dass ▷

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Ein echter
Hingucker ...

... ist die **Armbanduhr »Samui Moon«** mit ihrer binären blauen LED-Zeitanzeige, die Ihnen auf Knopfdruck die Zeit anzeigt. Die erste Zeile gibt dabei die Stunden an und die zweite Zeile die Minuten. Edelstahlgehäuse (Durchmesser: ca. 4 cm) mit Lederarmband, wasserdicht bis 3 ATM. Die Uhr hat 2 Jahre Garantie und kostet € 89;– zzgl. Porto. Diese und weitere Geschenkideen – wie z. B. den »Rubik's Cube« im Spektrum-Design oder unsere T-Shirts mit wissenschaftlichen Motiven – finden Sie unter

www.spektrum.de/lesershop

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH
Leserservice | Slevogtstr. 3–5 | 69126 Heidelberg
Tel.: 06221 9126-743 | Fax: 06221 9126-751
service@spektrum.com

▷ bei jedem Schritt alles sicher bleibt. Ein erfolgreiches Software-Design funktioniert ähnlich, nur dass viel mehr Randbedingungen erfüllt sein müssen.

Um seinen Zweck zu erfüllen, muss ein Prüfwerkzeug Gegenbeispiele aufspüren können: Lösungen, die zwar allen Randbedingungen genügen, aber dennoch zu ungewollten Resultaten führen. Mit solchen Fällen enthüllt das Testprogramm Unzulänglichkeiten im Design. In der Praxis mag das gar nicht immer gleich zu einer Katastrophe führen. Es kann auch bloß eine Macke im Entwurf sein. Nichtsdestoweniger sollte dann etwas korrigiert werden: das Design oder die Erwartungen des Programmierers.

Für gewöhnlich ist die Zahl der möglichen Szenarien selbst bei einem mäßig komplexen Programm bereits beträchtlich – während nur wenige zu Gegenbeispielen führen. Stellen Sie sich vor, Sie müssten planen, wer bei einer Hochzeit nebeneinander sitzt. Wenn alle Teilnehmer miteinander auskommen, ist das einfach. Mixen Sie aber einige Exlover unter die Hochzeitsgäste, erhält die Tischordnung sofort eine gewisse Brisanz.

Zu Tisch mit Romeo und Julia

Betrachten Sie nun einmal eine Feier für Shakespeares Romeo und Julia. Ihre Familien sind miteinander verfeindet. Romeo entstammt der Familie Montague und Julia ist eine Capulet. Gäbe es zwanzig Sitze, auf die sich jeweils zehn Gäste aus beiden Familien beliebig verteilen könnten, hätte man gut 10^{20} möglicher Kombinationen. Selbst ein Rechner, der pro Sekunde eine Milliarde Szenarien testen kann, bräuchte für eine Komplettprüfung gut 3000 Jahre.

Mit derartigen Problemen beschäftigten sich Forscher in den 1980er Jahren. Sie fanden heraus, dass im schlechtesten Fall eine Lösung nur durch Abzählen zu erzielen ist. Doch entwickelten die Informatiker seitdem neue Suchstrategien bei gleichzeitig steigender Rechenleistung. Mit diesen neuen Erkenntnissen entwickelten sie spezielle Automaten, die SAT heißen (von englisch *satisfiability*) und heute solche Mammutaufgaben ziemlich leicht bewältigen. Viele derartige Codes sind mittlerweile auf dem Markt und können Probleme mit Millionen von Randbedingungen lösen.

Wie der Name bereits andeutet (*to alloy*: vermischen), verbindet Alloy zwei Elemente, die ein Software-Design stabiler machen können. Bei dem einen handelt es sich um eine spezielle Sprache, mit der sich Struktur und Verhalten eines Programmdesigns aufklären lassen. Das andere ist ein Analysator (der einen SAT-Problemlöser enthält), der automatisch durch die Menge möglicher Szenarien pflügt.

Zuerst benötigt Alloy ein Designmodell – eine exakte Vorschrift, welche die Verhaltensweise des Systems und seiner Bestandteile wiedergibt, sowohl die erwünschten als auch die unerwünschten. Ein Informatiker definiert zunächst die verschiedenen Designobjekte und sortiert sie dann in Gruppen, die sich in Struktur und Verhalten ähneln (etwa jeweils alle Verwandten der Familien Capulet oder Montague in »Romeo und Julia«) und die über mathematische Beziehungen miteinander verbunden sind (wie, in welcher Beziehung nebeneinandersitzende Gäste zueinander stehen).

Danach kommen Tatsachen, die diese Gruppen und Beziehungen einschränken: die Randbedingungen. Diese enthalten die Mechanismen des Softwaresystems und Feststellungen über ihre Elemente (etwa Annahmen darüber, wie sich Benutzer verhalten sollen). Einige dieser Annahmen sind trivial – zum Beispiel, dass kein Capulet gleichzeitig ein Montague ist und dass jeder Gast stets genau neben zwei anderen sitzt. Andere spiegeln das Design wider: hier die Anforderung, dass jedem Tisch – mit Ausnahme des Haupttisches – nur jeweils eine der beiden Familien zugewiesen wird. Schließlich gibt es Ausnahmen, beispielsweise, dass Romeo und Julia zusammensitzen sollen, obwohl er ein Montague und sie eine Capulet ist.

Werkzeuge zur Prüfung von Software-Designs

Informatiker entwickeln Werkzeuge zum Testen beliebiger Software-Designs. Software-Entwickler nutzen diese, um ihre Programme nach strukturellen oder konzeptionellen Mängeln zu durchleuchten, die Fehlfunktionen auslösen könnten. Prinzipiell basieren diese Systeme auf hoch entwickelten Sprachen, die ganze Blöcke von Programmzeilen zusammenfassen. Sie wurden entwickelt, um Spezifikation, Modellierung und Simulation verschiedener Software-Programme zu vereinfachen.

Diese Werkzeuge enthalten automatische Analysatoren, die aus einer riesigen Menge möglicher Ausführungen diejenigen herausfiltern können, die zu unerwünschten Reaktionen führen.

Sprache	Werkzeug/Name	Quelle/Hersteller	Webseite
B	B-Toolkit	B-Core	www.b-core.com
	Atelier-B	Steria	www.atelierb.societe.com
	Pro-B	Universität Southampton	www.ecs.soton.ac.uk/~mal/systems/prob.html
CSP	FDR	Formal Systems Europe	www.fsel.com
FSP	LTSA	Imperial College London	www.doc.ic.ac.uk /~jnm/book/ltsa/LTSA.html
Lotos	CADP	INRIA Research Institute	www.inrialpes.fr/vasy/cadp/
OCL	USE	Universität Bremen	www.db.informatik. uni-bremen.de/projects/USE/
PROMELA	Spin	Bell Laboratories	http://spinroot.com/
State-charts	Statemate	I-Logix	www.ilogix.com
VDM	VDMTools	CSK Corporation	www.csk.com/support_e/vdm/ www.vdmbook.com/tools.php
Z	Jaza	University of Waikato	www.cs.waikato.ac.nz/~marku/jaza/
Zing	Zing	Microsoft Research	http://research.microsoft.com/zing/

Alloy hat schwere Defizite im Design bei Programmen aufgespürt, die bereits auf dem Markt waren

EMILY HARRISON

Alloy überprüft Software-Programme, die Drucker in drahtlosen Netzwerken finden.

Der Analysator von Alloy bedient sich eines SAT-Lösers, um Gegenbeispiele aufzuspüren – mögliche Szenarien also, die zwar durch das Design gedeckt sind, aber jeder Vernunft widersprechen. Mit anderen Worten: Das Prüfprogramm versucht, Situationen zu konstruieren, welche den Tatsachen genügen, die aber Behauptungen verletzen. In unserem Fall würde Alloy einen Sitzplatzplan erzeugen, in dem am Haupttisch ein Capulet (der oder die nicht Julia ist) zusammen mit einem Montague (der oder die nicht Romeo ist) sitzt. Um das zu vermeiden, können wir eine neue Bedingung hinzufügen: Romeo und Julia sitzen an diesem Tisch ganz allein. Jetzt könnte auch Alloy kein Gegenbeispiel mehr entdecken.

Sichere Bordkarten

Sätze und Relationen bilden zusammen mit den Tatsachen und Behauptungen eine Abstraktion, die das Wesentliche des Software-Designs abbildet. Sie zeigt den Informatikern die expliziten Grenzen ihres Designs und zwingt sie, sich gut zu überlegen, welche Abstraktionen am besten funktionieren werden. Eine schlechte Wahl an dieser Stelle ist oft die Ursache zahlreicher unnötig komplizierter und unzuverlässiger Systeme. Software-Systeme, die auf einfachen und belastbaren Grundgedanken beruhen, vereinfachen dagegen das Leben. Gute Beispiele dafür sind die elektronischen Bordkarten für den Flugverkehr, die einheitlichen Barcodes von Supermarktprodukten oder die 0800-Nummern für Telefonkonferenzen.

Werkzeuge wie Alloy werden derzeit hauptsächlich in der Forschung eingesetzt oder in forschungsintensiven Hightechfirmen. Mit dem Programm wurde beispielsweise eine neue Architektur für Telefonschaltungen untersucht. Auch Prozessoren für die Flugzeugindustrie wurden damit entworfen, um sie vor Hackern zu schützen, sowie Steuerungsrichtlinien für den Zugang zu Kommunikationsnetzen. Und schließlich wurden Protokolle zum Auffinden von Druckern in Netzwerken getestet sowie Systeme zum Synchronisieren von Daten über verschiedene Rechner hinweg.

Alloy hat Mängel auch in bereits publizierten Programmdesigns aufgedeckt. Ein zentrales Managementprotokoll sollte zum Beispiel garantieren, dass nur Mitglieder einer bestimmten Gruppe Zugang haben. Es hat aber auch ehemaligen Mitgliedern den Zugang erlaubt, statt sie abzuweisen. Viele Programmierer waren über die Menge der Fehler überrascht, die Alloy bereits in seiner einfachsten Version aufdeckte. Es ist wahrscheinlich nur eine Frage der Zeit, bis Software-Werkzeuge wie Alloy in der Industrie umfassend eingesetzt werden. Verbesserungen in den zu Grunde liegenden SATs beschleunigen die automatische Analyse immer mehr und ermöglichen die Diagnostik selbst umfangreicher Systeme. Daher gewinnt das Modellieren besonders unter Fachleuten an Popularität, die im Design einer Software mehr sehen als nur einen einfachen Quellcode.

Die Zeit wird kommen, da Rechenprogramme so unerlässlich für unser tägliches Miteinander sein werden, dass wir schlechte Software-Entwicklungen nicht mehr hinnehmen können. Es ist sogar vorstellbar, dass Behörden künftig nur noch hochwertige Entwicklungsverfahren für Software genehmigen. Eines Tages wird es sehr gut durchdachte Computerprogramme geben, die so stabil, vorhersagbar und einfach funktionieren, wie man es sich immer schon gewünscht hat. ◁

Daniel Jackson (links) leitet die Software-Design-Gruppe des Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory am Massachusetts Institute of Technology. Er studierte an der Universität Oxford Physik und promovierte am MIT in Informatik, wo er heute als Professor lehrt. **Gerhard Samulat** studierte Physik an der Universität Hamburg. Seine Diplomarbeit fertigte er am Teilchenbeschleuniger Desy in Hamburg an. Seither arbeitet er als freier Journalist für Wissenschaft und Technik.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Alloy-Webseite: http://alloy.mit.edu

Software abstractions: Logic, language, and analysis. Von D. Jackson. MIT Press, 2006. D. Jacksons Webseite: http://people.csail.mit.edu/dnj/

Alloy: A lightweight object modelling notation. Von D. Jackson in: ACM transactions on software engineering and methodology, Vol. 11, Bd. 2, S. 256, April 2002

Weitere Weblinks zum Thema finden Sie bei www.spektrum.de/artikel/858941.

JUNGE WISSENSCHAFT

Multimedialer Schüleraustausch

Der Wettbewerb »Join Multimedia« hat zehn Jahre lang immer wieder aufs Neue Jugendliche zu Höchstleistungen im Umgang mit Computern angespornt.

Von Emanuela Buyer

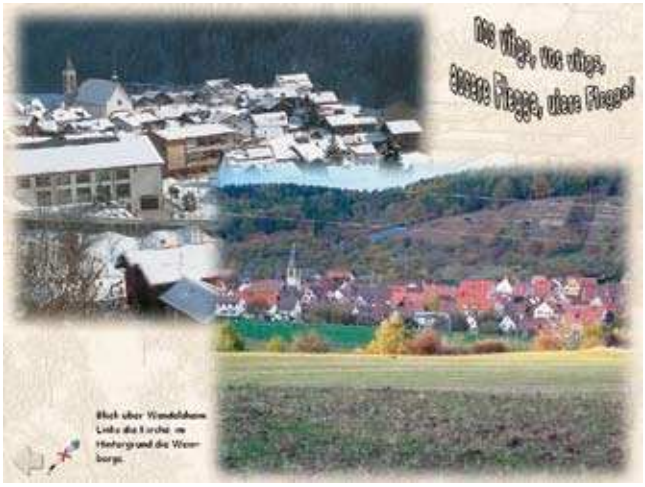
Nun sehen wir die Präsentation der Gruppe des I Liceum Ogólnokształcące im. Bolesława Krzywoustego aus Nakło nad Notecią …« Nicht nur beim Namen dieser Siegerschule hat die Moderatorin sichtlich Probleme mit der Aussprache. Zur Preisverleihung des Wettbewerbs »Join Multimedia« am 17. September 2003 in München sind Teilnehmer aus fast allen Ländern Europas zusammengekommen. Die Anzahl der Einsendungen aus Osteuropa, vor allem aus Rumänien und Serbien-Montenegro, beeindruckt.

Als der Siemens-Konzern das Projekt vor zehn Jahren ins Leben gerufen hatte, war es noch eine ausschließlich deutsche Sache. Seitdem ist die Anzahl der Beiträge ebenso wie die der vertretenen Länder Jahr für Jahr angewachsen. Während 1998 noch alle 366 Einsendungen aus Deutschland kamen, nahmen im Jubiläumsjahr 2006 schon 4500 Teams aus 37 Ländern teil.

Wettbewerbsaufgabe war in jedem Jahr, eine interaktive Computerpräsentation zu einem von drei bis vier vorgegebenen Themen zu erstellen, die in der Regel aus den Bereichen Schule, Umwelt sowie Kultur und Region stammen. Dabei mussten die Schüler Beschränkungen bei Dateigröße und Seitenzahl beachten. Bei der Bewertung legte die internationale Jury Wert auf Originalität, Interaktivität, inhaltliche Qualität, Attraktivität des Layouts und mehr. Auch für technische Besonderheiten wie virtuelle Welten oder animierte Bilder gab sie Pluspunkte. Und gerade auf diesen Feldern sind die Leistungen im Lauf der zehn Jahre rapide angestiegen. Anfangs konnte man mit einer einfach verlinkten Homepage mit interessantem Inhalt noch das Siegertreppchen besteigen, und Animationen und Videos waren etwas Besonderes. Die späteren Werke strotzen dagegen nur so von technischen Raffinessen.

Ein Beispiel ist das Siegerprojekt 2003 in der Gruppe der 16- bis 21-Jährigen. Zum Thema »Schüler machen Unterricht: Unterrichtsprojekte« gestalteten vier Jungen und zwei Mädchen des Jakob-Bruckner-Gymnasiums in Kaufbeuren eine interaktive Kunststunde mit dem Thema Renaissancemalerei. In einer Computeranimation können die Benutzer in das Bild »Gastmahl im Haus des Levi« von Paolo Veronese (1528–1588) eintauchen und dabei intensiv die Auswirkungen der Licht- und Größenverhältnisse und die Technik der Fluchtpunktzeichnung erleben. Als Auflockerung zum Spielen und zum Vertiefen kann man das Bild als Puzzle zusammen-

Als Gast in der Schweiz muss sich der württembergische Löwe vegetarisch ernähren und den rollenden Käse fangen. Die Tiere tragen das Menü durch die Gegend (unten). Rechts stellen die Schüler aus Rottenburg-Wendelsheim und Rueun ihre Heimatorte einander gegenüber.



ALLE SCREENSHOTS: SIEMENS AG, GENERATION 21

setzen. Zum Abschied präsentieren sich die Mitglieder der Gruppe als Figuren in bekannten Bildern der Renaissance.

»Der Rohstoff Zukunft wächst zwischen den Ohren unserer Kinder«, so kommentierte Steffen Reiche, brandenburgischer Minister für Jugend und Sport, bei der damaligen Preisverleihung sehr treffend das erstaunliche Niveau und den Einfallsreichtum, mit dem die Schüler ihre Werke gestalteten.

Zusammenarbeit in Europa

Um den besonderen »Team Europe«-Preis zu gewinnen, der vor vier Jahren eingeführt wurde, müssen Gruppen aus mindestens zwei Ländern ein gemeinsames Projekt erstellen. Das ist Teamwork unter stark erschwerten Bedingungen, da die Beteiligten sich oft nur über Internet verständigen können und zudem auch Sprachbarrieren überwinden müssen.

Schon 2003 verblüffte eine Gruppe von der Kyiv-Mohyla-Akademie der ukrainischen Nationaluniversität in Mykolayiv und der Gewerblichen Schule in Schwäbisch Gmünd durch das technische und inhaltliche Niveau ihrer Darbietung. In der Einführungssequenz führt ein virtueller Mann in einer virtuellen Welt den Nutzer auf beinahe schon philosophische Weise an das Thema heran: Der Zuschauer fliegt zunächst über eine paradiesische computergenerierte Landschaft. Im nächsten Moment zoomt die Kamera auf Abstand, und man erkennt, dass der Mann das Paradies in den Händen hält. Dieser wiederum steht in einer ähnlichen Landschaft. Plötzlich verdorrt das Paradies, und zurück bleibt eine braune, fruchtlose Einöde.

Als Benutzeroberfläche dient die grüne Vielfalt der Landschaft, in welcher der Benutzer zahlreiche Landmarken wie Ölpumpen, Windenergieräder, einen Wasserfall und mehr ansteuern kann. Durch einen Mausklick gelangt man an Informationstexte, Videos und Bilder über spezielle Energien und Ressourcen.

Auch letztes Jahr wurde ein besonders gelungenes Werk prämiert. In »Scolast, Scolasta – so semmer hald« vergleichen Grund- und Hauptschüler aus Rottenburg-Wendelsheim und aus Rueun in Graubünden ihr Leben, ihre Schule und ihre Kulturen miteinander. So erfährt man unter anderem, dass die Rätoromanisch sprechenden Schweizer ihre Lehrer nicht mit Namen, sondern mit dem Titel »Scolast« oder »Scolasta« (»Lehrer« oder »Lehrerin«) ansprechen. Außerdem müssen sie in der Schule Hausschuhe tragen, und die Schulglocke klingt um vieles freundlicher als die der Deutschen.

Als besonders originelle Idee fallen sofort die Wappentiere der Regionen auf, die den Benutzer durch die Seiten begleiten (Bilder links unten). Während sich zu Anfang der Graubündner Steinbock und der baden-württembergische Löwe noch über den Bildschirm jagen, finden sie sich etwas später im Labyrinthspiel trotz Widrigkeiten alsbald in Freundschaft vereint. Aufgelockert wird die Seite durch Videos der Schwaben, die sie während eines Besuchs in der Schweiz gedreht hatten, und durch zahlreiche Bilder. Individuelle Kommentare zum Erlebten und Beobachteten lassen die Arbeit sehr persönlich und authentisch wirken.

Im Jubiläumsjahr 2006 stellten in der Altersgruppe bis zu fünfzehn Jahren zwölf Grundschüler der Petefi Brigada aus Kula ihre multikulturelle Provinz Vojvodina im Norden Serbiens vor. Ihr vor allem inhaltlich beeindruckendes Werk »Europe in Vojvodina« ist geschickt mit kleinen selbst gespielten Szenen untermalt. Deutlich streichen sie die unglaubliche Vielfalt ihrer Heimat hervor, die 26 ethnische Gruppen, sechs offizielle Landessprachen und zwei Alphabete zu bieten hat. Da gibt es viel zu vergleichen, von Bräuchen und Religion bis hin zu Kochrezepten. Aus insgesamt acht verschiedenen Bevölkerungsgruppen kann man Volksmusik in Form von Texten, Informationen und von den Kindern eigens aufgenommenen Hörbeispielen genießen. Und wenn der ▷

wis
wissenschaft in die schulen!

Wollen Sie Ihren Schülern einen Anreiz zu intensiver Beschäftigung mit der Wissenschaft geben? »Wissenschaft in die Schulen!« bietet teilnehmenden Klassen einen Klassensatz **»Spektrum der Wissenschaft«** oder **»Sterne und Weltraum«** kostenlos für ein Jahr, dazu didaktisches Material und weitere Anregungen.
www.wissenschaft-schulen.de

Schüler der Petefi Brigada stellen ihre multikulturelle Region Vojvodina vor, hier zum Thema Weihnachten (links). Die animierte Galerie mit Werken des Malers Marc Chagall zeigt dessen Geburtsort Witebsk aus einem neuen Blickwinkel (unten). Das Liebespärchen schwebt durchs Zimmer.

▷ Betrachter fleißig übt, gelingt ihm am Ende eine Begrüßung und Vorstellung in acht verschiedenen Sprachen.

Den ersten Platz in der Gruppe der älteren Schüler belegt das Kunst-Gymnasium Nr. 4 aus Wizebsk (Witebsk) in Weißrussland. Das Thema »People and places: Your region – an insider's guide« bekam in ihren Händen eine ganz eigene Note. Kreativ und passend zur Schule stellen sie ihre Stadt aus dem Blickwinkel des Malers Marc Chagall (1887–1985) vor, der in Wizebsk aufgewachsen ist (Bild S. 93 unten rechts). Mit viel Aufwand und Liebe bringen sie dabei Leben in seine Werke: Hier fliegt ein Pärchen durch die Lüfte, dort klappert ein Fensterladen, und irgendwo wippt eine Frau in einem Schaukelstuhl auf und ab.

Zum Jubiläumsjahr ließen sich die Veranstalter für die Gewinnergruppen noch eine zusätzliche Herausforderung einfallen. Jeweils zwei der sechs besten Gruppen mussten innerhalb von vier Wochen ein gemeinsames Projekt erarbeiten. Nur beim Treffen der Sieger hatten sie kurz Zeit, das Erdachte anzugleichen und Feinabstimmungen zu machen. Die Ergebnisse konnten sich durchaus sehen lassen.

Nach zehn erfolgreichen Jahren wird »Join Multimedia« von einem neuen Wettbewerb abgelöst: Zum Thema »Lebens(T)Raum Stadt« sollen Schüler ab der elften Klasse in den Bereichen Mathematik, Physik und Technik Visionen schaffen. Schon im Februar werden die Teams zu den regionalen Ausscheidungen geladen und im März wird der bundesweite Sieger festgelegt. ◁

Emanuela Buyer hat Physik studiert und ist freie Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.

Lebens-(T)Raum Stadt

Der »Siemens Schülerwettbewerb« zielt darauf ab, die Jugendlichen für angewandte Mathematik, Technik und Naturwissenschaften zu begeistern. Angesprochen sind die Jahrgangsstufen 11 bis 13. Die Preisverleihung für den diesjährigen Wettbewerb mit dem Namen »Lebens-(T)Raum Stadt« wird im März 2007 stattfinden.
Infos gibt es unter: http://w3.siemens.de/generation21/deutschland/de/pages/schulprojekte.php

PREISRÄTSEL

Der Navigator

Von Paul von der Heyde

Nachdem sie die Insel in weniger als zwei Tagen umsegelt hatten, lagen sie wieder am alten Platz in der Bucht vor Anker. Fernando lehnte an der Reling und schaute etwas melancholisch über die weite See nach Südwest. Er wusste: Genau in dieser Richtung lag seine spanische Heimat, Madrid. »Verdammt knapp, Omar, aber Sie haben die Wette gewonnen«, wandte er sich lächelnd an den Schiffskoch. »Ich hab's nachgerechnet. Bestellen Sie Luka, nach Zagreb wär's von hier tatsächlich ein paar Meilen weiter als nach Tunis.«

Um die Wette zu entscheiden, musste Fernando präzise rechnen. Keine besonderen navigatorischen Kenntnisse sind dagegen nötig, um unsere Frage zu beantworten: Wie heißt die Insel?

Schicken Sie Ihre Lösung in einem Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg oder per E-Mail an preisraetsel@spektrum.com. Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir drei Victorinox-Allzweck-Etuis »SwissCard Quattro«. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, den 16. 01. 2007, eingehen. Unsere Preisrätsel finden Sie ab sofort auch im Internet unter www.spektrum.de/preisraetsel.

Lösung zu »Ein Hotelier in Schwierigkeiten« (November 2006)

30 Mathematiker waren angemeldet, aber nur 27 von ihnen reisten tatsächlich an. Für eine andere Anzahl von Kongressteilnehmern sind die Bedingungen nicht erfüllbar.

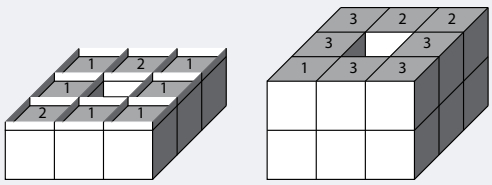
Da im Obergeschoss doppelt so viele Teilnehmer wohnen sollen wie im Erdgeschoss, ist deren Anzahl durch 3 teilbar.

In den sechs Zimmern entlang jeder Fassade sollen zusammen je elf Mathematiker untergebracht werden, also wohnen entlang zweier gegenüberliegender Fassaden insgesamt 22 Mathematiker. Da die verbleibenden vier Zimmer jeweils mit mindestens einer, aber höchstens drei Personen belegt sind, liegt die Gesamtzahl zwischen 26 und 34. In diesem Bereich sind nur die Zahlen 27, 30 und 33 Vielfache von 3.

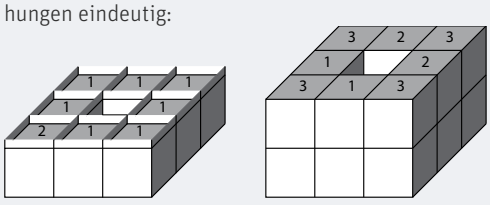
Für 33 Teilnehmer gibt es keine Zimmerverteilung, welche den gegebenen Regeln gerecht wird. In diesem Fall müsste man nämlich 22 Personen im Obergeschoss unterbringen, dort also entweder zwei Doppel- und sechs Dreierzimmer oder ein Einzel- und sieben Dreierzimmer bilden. Die verbleibenden elf Personen kann man nun nicht mehr im Erdgeschoss unterbringen, ohne dass entlang einer Fassade mehr als elf Personen wohnen, was nicht zulässig ist.

Somit sind Belegungen, die alle vier Bedingungen erfüllen, nur mit 27 oder 30 Teilnehmern möglich.

Für 30 Teilnehmer gibt es viele (114) Unterbringungsmöglichkeiten. Abgesehen von Drehungen und Spiegelungen sind davon 20 wesentlich verschieden, eine davon ist die folgende:



Für die tatsächlich angereisten 27 Teilnehmer ist die Lösung dagegen bis auf Drehungen eindeutig:



Die Gewinner der drei Rucksäcke »Elefant« sind Sabine Probst, Duisburg; Kurt Winterstein, Wien; und Reinhard Göller, Karlsruhe.

Lust auf noch mehr Rätsel? Unsere Online-Wissenschaftszeitung spektrumdirekt (www.spektrumdirekt.de) bietet Ihnen unter dem Stichwort »Knobelei« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

Vögel sehen die Welt bunter

Ein Vogel nimmt mehr Farben wahr als wir – ein altes Erbe, das den Säugetieren verloren ging. Die Primaten fanden dafür nur schwachen Ersatz.

Von Timothy H. Goldsmith

Gern halten wir Menschen unser Sehvermögen für eine Spitzenleistung der Evolution. Dank ihm können wir Dinge auf einige Entfernung sehen, den Raum abschätzen und uns darin ohne anzustoßen bewegen. Auf einen Blick erkennen wir Personen und oft sogar deren Stimmung. Der Mensch ist in so hohem Grad ein Augentier, dass er sich schlecht in Wesen hineinversetzen kann, die sich anders orientieren, wie etwa Fledermäuse, die ihre Beute anhand des Reflexionsmusters ihrer eigenen Rufe orten.

Doch sogar was unseren eigenen Sehsinn betrifft, fällt es uns schwer, seine Begrenztheit im Vergleich zu dem mancher anderen Tiere zu ermessen. Selbst unser Farbsinn, auf den wir uns viel einbilden, wird von dem so mancher Tierart ausgestochen. Das Ausmaß der Unterschiede entdeckten Forscher allerdings erst spät. Denn das meiste Wissen über Farbempfindung beruhte auf Tests an Menschen. Mit ihnen kann man am leichtesten Experimente anstellen – etwa dazu, wie bestimmte Farbmischungen erscheinen, wann beispielsweise zwei verschiedene Mischungen als gleiche Farbnuance wirken.

Zwar studieren Wissenschaftler schon lange, unter anderem mit neurophysiologischen Verfahren und Lerntests, auch die Farbwahrnehmung einer Reihe von Tierarten. Dennoch entdeckten sie erst in den frühen 1970er Jahren, dass viele Wirbeltiere auch im nahen Ultraviolett (unterhalb von 400 Nanometern) Farben erkennen, somit bei für Menschen und die meisten Säuger normalerweise nicht sichtbaren Wellenlängen. Eine UV-Tüchtigkeit scheint in den anderen Wirbeltierklassen so verbreitet vorzukom-

In Kürze

- Als Sinneszellen für ein Farbensehen dienen den Wirbeltieren die **Zapfen in der Netzhaut**, deren Pigmente unterschiedliche **Lichtwellenlängen** absorbieren. Die meisten Säugetiere verfügen über zwei Zapfentypen, der Mensch und ein Teil der Primaten über drei, die Vögel über vier – wie auch viele Reptilien und Fische.
- Die Säugetiere verloren in einer frühen Evolutionsphase zwei der ursprünglichen Zapfentypen. Durch eine **Genverdoppelung** entstand bei den Primaten ein neuer dritter Typ.
- Die Farbwelt der Vögel dürfte recht anders, vor allem reicher, breiter und differenzierter als unsere sein. Vögel sehen auch **nahes ultraviolettes Licht** und für uns unvorstellbare **Mischfarben**. Vielleicht nehmen sie außerdem uns unbekannte Farbdimensionen wahr.

CORBIS / DPA, BORIS RÖSSLER

Die meisten Vögel, wie auch dieser Flamingo, sehen eine für uns unvorstellbare Farbenvielfalt, vermutlich sogar uns fremde Farbqualitäten.

men, dass die Säugetiere eher als Ausnahme dastehen.

Entdeckt wurde Ultraviolettsehen im 19. Jahrhundert an Insekten. John Lubbock, ein Nachbar und Freund des Evolutionsforschers Charles Darwin, beobachtete um 1880, dass Ameisen ihre Larven retteten, wenn UV-Licht auf diese fiel. Sie schleppten sie ins Dunkle oder dorthin, wo Licht längerer Wellenlänge auftraf. Seit etwa 1950 haben der österreichische, lange Jahre in München lehrende Zoologe Karl von Frisch, seine Schüler und deren Schüler nicht nur nachgewiesen, dass Bienen und Ameisen UV-Licht als eigene Farbe sehen, sondern auch, dass sie die Polarisationsmuster von UV-Licht am Himmel erkennen und als Kompass benutzen.

Verarmte Säugetiere

Bald erwiesen sich immer mehr Insektenarten als UV-tüchtig. Eine Zeit lang glaubten die Forscher, es handele sich um einen spezifischen, gewissermaßen geheimen Sinn der Kerbtiere, der deren Feinden aus der Vogelwelt nicht offen steht. Doch das war ein Irrtum! In den letzten 35 Jahren wurden UV-Rezeptoren in der Netzhaut nicht nur bei Vögeln nachgewiesen, sondern auch in verschiedenen Zweigen anderer Wirbeltierklassen; etwa bei einigen Reptilien – Eidechsen und Schildkröten – sowie bei vielen Fischen. Die meisten Vögel scheinen im UV-Bereich sehen zu können. Warum ist ausgerechnet die Farbwahrnehmung der Säugetiere in dieser Hinsicht eingeschränkt? Als Wissenschaftler dieser Frage nachgingen, stießen sie auf faszinierende Evolutionszusammenhänge. Zudem lassen die Forschungen zumindest erahnen, wie viel farbreicher als unsere die visuelle Welt der Vögel ist.

Bevor ich Details erörtere, möchte ich ein häufiges Missverständnis ausräumen. Wir lernen in der Schule, dass Objekte bestimmte Wellenlängen vom auftreffenden Licht absorbieren und den Rest reflektieren. Was wir als die Farbe einer Sache wahrnehmen, bezieht sich auf den reflektierten Lichtanteil. Jede Farbe bestimmt sich aus reinen oder gemischten Wellenlängen. Das ist so weit richtig. Jedoch ist Farbe, wissenschaftlich betrachtet, weder eine Eigenschaft des Lichts noch eine des Objekts. Vielmehr handelt es sich um eine Wahrnehmung, also um das Ergebnis eines Verarbeitungsprozesses im Gehirn.

Der erste Schritt dieses Vorgangs geschieht in einer Fraktion von Sinneszellen der Netzhaut. Zum Farbensehen benötigen wir die so genannten Zapfen, von denen mehrere Typen oder Klassen vorhanden sind. (Die Fraktion der Stäbchen erlaubt nur Schwarz-Weiß-Sehen und arbeitet bei schwachem Licht.) Jeder Zapfen enthält ein Pigment, das Licht eines Ausschnitts des Spektrums absorbiert (siehe Kasten S. 98). Dieses Pigment – auch Sehfarbstoff genannt – be- ▷

▷ steht jeweils aus einer Variante des Proteins Opsin im Verbund mit Retinal, einem Abkömmling von Vitamin A. Wenn das Pigment Licht absorbiert (korrekter ausgedrückt: Lichtquanten oder Photonen, also diskrete Energiepakete), verändert das Retinal seine Form. Es klappt gewissermaßen ein. Das wiederum setzt in der Sinneszelle eine molekulare Kaskade in Gang, wodurch die Zelle schließlich erregt wird und nun Neuronen in der Netzhaut aktiviert. Diese schicken dann über den Sehnerv Impulse ins Gehirn.

Je intensiver das Licht ist, umso mehr Lichtquanten werden von den Sehpigmenten absorbiert, umso größer ist die Erregung der einzelnen Zapfen und als umso kräftiger und heller wird das Licht empfunden. Allerdings kann ein einzelner Zapfen beziehungsweise Zapfentyp dem Gehirn nicht mitteilen, welche Wellenlänge aus dem Spektrum zu seiner Erregung führte. Denn ein Sehpigment spricht nicht gleich stark auf die verschiedenen Bereiche des Lichtspektrums an, für die es empfänglich ist. Einige absorbiert es besser als andere, und jede Pigmentsorte hat ihr spezifisches Absorptionsmaximun.

Somit hat jeder Zapfentyp eine andere Empfindlichkeitskurve. Zwei unterschiedliche Wellenlängen können beim selben Zapfen unter Umständen eine gleich starke Erregung auslösen, weil die Sinneszelle mit Hilfe ihres Sehfarbstoffs gewissermaßen nur die absorbierten Lichtquanten zählt. Auch kann die Zelle durch intensives Licht einer relativ schlecht absorbierten Wellenlänge ebenso stark erregt werden wie durch schwaches Licht eines gut absorbierten Bereichs des Spektrums.

Zur Farbwahrnehmung verhilft das Zusammenspiel verschiedener Zapfentypen – das heißt Zapfen mit unterschiedlichen Pigmenten und dadurch unterschiedlichen Absorptionsmustern. Farben erkennt das Gehirn erst, wenn es erfährt – und vergleicht –, wie stark mindestens zwei Zapfentypen reagiert haben. Daran ermisst es Überschneidungen bei den verschiedenen Typen. Zwei in einem Spektrumbereich empfindliche Zapfensorten, sprich Pigmente, genügen im Prinzip schon, um ein paar Farben wahrzunehmen. Jedoch wächst die Farbtüchtigkeit, die Differenzierungsfähigkeit, wenn mehr Typen von Zapfen vorhanden sind. Die Farbpalette wird breiter, nuancierter und reicher. Auch dürften neue Farbqualitäten hinzukommen.

Wie gesagt lassen sich die Zapfensorten durch ihr Sehpigment kennzeichnen. Und zwar unterscheiden sich die einzelnen Sehfarbstoffe im Opsin, der Proteinkomponente. Forscher haben die Gene für die verschiedenen Opsine untersucht und bei unterschiedlichen Wirbeltieren deren Verwandtschaft und Herkunft verglichen. Es gelang ihnen durch Analysen der genetischen Sequenzen, für diese Gene Evolutionsstammbäume zu erstellen (siehe Kasten rechte Seite).

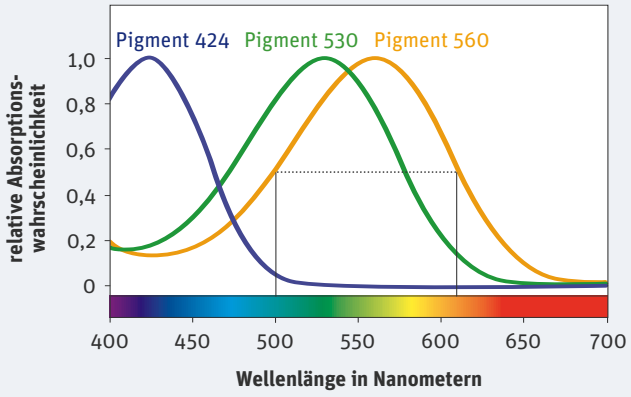
Vier Farbpigmente

Demnach handelt es sich um stammesgeschichtlich alte Proteine. Opsine sind offenbar älter als die heute vorherrschenden Wirbeltiergruppen. Vier Genlinien für Zapfenpigmente – jede für ein anderes

Farbspiegel im menschlichen Auge

Dank des Zusammenspiels dreier unterschiedlicher Sehpigmente, verteilt auf drei Zapfentypen (einer Fraktion von Sinneszellen) in der Netzhaut, nehmen wir die uns bekannten Farben wahr. Jedes Pigment hat sein Absorptionsmaximum bei einer anderen Wellenlänge des eintreffenden Lichts. Dadurch sind die Zapfentypen für die Wellenlängen unterschiedlich empfindlich.

Wie die Grafik andeutet, müssen für einen eindeutigen Farbeindruck, den das Gehirn ermittelt, mindestens zwei der Zapfentypen zugleich erregt werden. Der Grund: Jeder Typ für sich reagiert in großen Bereichen auf zwei verschiedene Wellenlängen gleich stark.



ALLE ILLUSTRATIONEN DES ARTIKELS: JEN CHRISTIANSEN; NACH: TIMOTHY H. GOLDSMITH

Pigment – lassen sich weit in die Wirbeltiervergangenheit zurück rekonstruieren. Eines der Pigmente absorbierte am besten langwelliges (gelbes) Licht, eines die mittleren für uns sichtbaren Wellenlängen, eines für uns sichtbares kurzwelliges (blaues) und eines ultraviolettes Licht (siehe Kasten auf dieser Seite). Der präzise Absorptionsbereich dieser vier Sehfarbstoffe kann sich im Verlauf der Evolution im Einzelfall etwas verschoben haben.

Außer Zapfen besitzen Vertreter aller großen Wirbeltiergruppen in der Netzhaut auch Stäbchen, die Sehen bei schwachem Licht erlauben. Das lichtempfindliche Pigment der Stäbchen ist das Rhodopsin. In seiner Struktur wie in seinen Absorptionseigenschaften ähnelt es stark den Zapfenpigmenten für Wellenlängen im mittleren Bereich des Lichtspektrums. Vor einigen hundert Millionen Jahren muss es aus diesen hervorgegangen sein.

Vögel bilden vier verschiedene Zapfenpigmente – und damit Zapfensorten – aus, die sich direkt den vier alten Genlinien zuordnen lassen. Der Großteil der Säugetiere besitzt hingegen nur zwei Zapfenpigmente und damit nur zwei Sorten von Zapfen. Einer dieser beiden Sehfarbstoffe absorbiert am besten lange Lichtwellen, der andere kurze im Violetten. Offenbar verloren die Säugetiere in ihrer Frühzeit zwei der Pigmente, die ihre Vorfahren anscheinend noch besessen hatten. Nach den genetischen Vergleichen behielten sie nur die Pigmente für langwelliges und – ursprünglich – für UV-Licht, wobei sich die höchste Empfindlichkeit dieses Sehfarbstoffs mehr ins Violette verschob. (Interessanterweise würden wir ohne Augenlinse, die bei den Säugern UV-Licht filtert, auch nahes UV-Licht sehen.)

Die Wissenschaftler vermuten, dass ein hoch entwickeltes Farbsehen für die frühen Säuger nicht wichtig war. Damals im Erdmittelalter, der Blütezeit der Dinosaurier, waren ihre Arten wohl eher klein, lebten heimlich und schützten sich vor Raubfeinden, indem sie in die Nacht auswichen. Um im Dunkeln gut sehen zu können, entwickelten sie hochsensible Stäbchen. Anscheinend genügten ihnen für das Sehen bei Tag zwei Zapfentypen durchaus.

Erst nach dem Untergang der Dinosaurier vor 65 Millionen Jahren kam die große Zeit der Säugetiere. Sie spalteten sich nun in ganz unterschiedliche Linien auf und bildeten Gruppen mit völlig verschiedenen, auch neuartigen Lebensweisen. Eine neue Gruppe waren die Primaten. Auch sie lebten ursprünglich nachtaktiv, wie heute noch viele Halbaffen. Aber eine ihrer Linien, aus der auch die Vorläufer der Altweltaffen – und somit der Mensch – hervorgingen, wurde tagaktiv. Früchte, die diese Primaten in den Bäumen fanden, machten einen bedeutenden Teil ihrer Nahrung aus.

Rot und Gelb vor Grün

Uns fallen Blumen und Früchte meist schon deswegen ins Auge, weil sie zum Laub einen Farbkontrast bilden. Sie reflektieren andere Lichtwellen als grüne Blätter. Doch Baumtiere mit nur einem Zapfenpigment für langwelliges Licht hätten das nicht bemerkt. Für uns heben sich Rot und Gelb vor einem grünen Hintergrund ab. Für diese Tiere wären solche Früchte tarnfarben. Dagegen fand die Evolution bei den Primaten einen Ausweg.

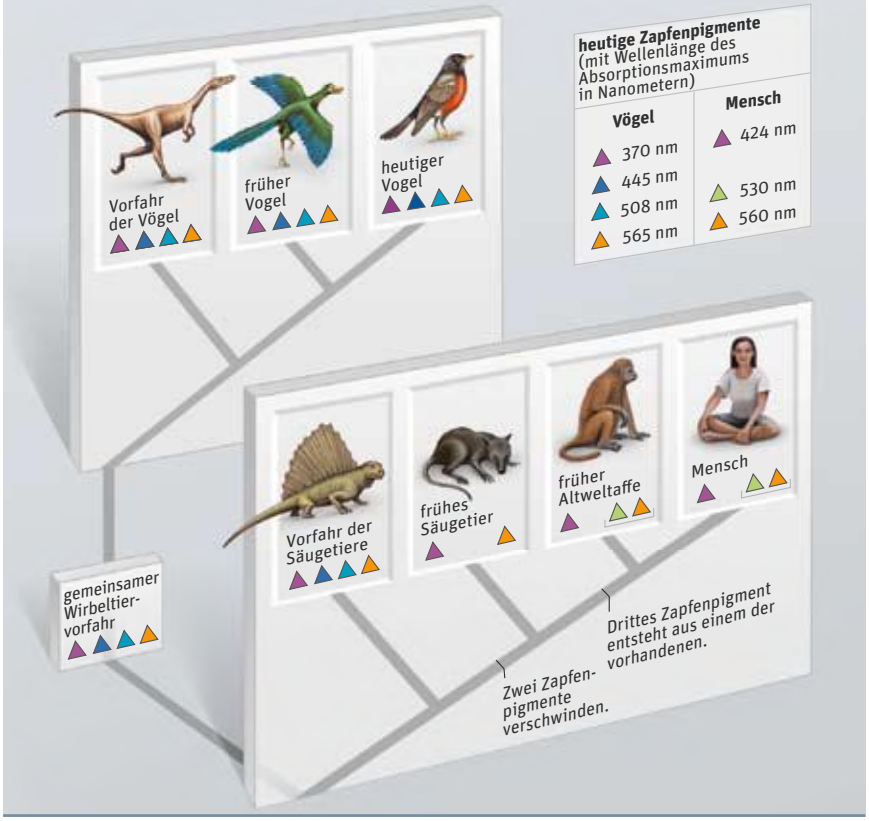
Wenn sich das Erbgut bei der Bildung von Ei- und Samenzellen halbiert und auch ganze Chromosomenabschnitte sich neu sortieren, kommt es vor, dass die Aufteilung ungleich ausfällt, wenn nämlich ein Chromosomenarm etwas zu viel Material erhält. Vielleicht ist an- ▷

Vögel – von der Evolution bevorteilt

Genvergleiche heutiger Arten enthüllen die Evolution der Farbtüchtigkeit bei Vögeln und Säugern. Wahrscheinlich besaßen Wirbeltiere früh vier verschiedene Zapfentypen mit jeweils unterschiedlichen Sehpigmenten – hier als verschiedenfarbige Dreiecke symbolisiert (kleiner Kasten links unten). Heutige Reptilien, aber auch Fische bilden diese vier Typen aus.

Die Säugetiere, die wohl zunächst nachtaktiv waren, müssen zwei Zapfentypen beziehungsweise Sehpigmente verloren haben. Ganz anders die aus Dinosauriern hervorgegangenen Vögel: Sie haben alle vier Zapfentypen bewahrt.

Nach dem Untergang der Dinosaurier wagten sich Säugetiere in den Tag hinaus. Bei Ahnen der Altweltaffen dürfte ein neuer Zapfentyp mit einem dritten Sehpigment entstanden sein. Das Gen für eines der beiden vorher vorhandenen Pigmente (gelb) scheint sich verdoppelt zu haben. Dann muss eines hiervon mutiert sein (grün).



▷ schließend ein Gen doppelt vorhanden. Falls dieses nicht wieder verloren geht, kann es im Lauf der Zeit mutieren und unter Umständen schließlich zu einer neuen, nützlichen Eigenschaft verhelfen.

Nach Jeremy Nathans und David Hogness, die früher an der Stanford-Universität (Kalifornien) arbeiteten, geschah etwas Derartiges vor weniger als vierzig Millionen Jahren bei den Ahnen der Altweltaffen mit dem Gen des Pigments für lange Wellenlängen (siehe Spektrum der Wissenschaft 4/1989, S. 68). Das überzählige Gen blieb und mutierte – so entstand ein neues Farbsehpigment, und jene Primaten, deren Vorläufer sich noch dichromatisch orientierten, entwickelten sich zu so genannten Trichromaten. Auch das neue Pigment schluckt immer noch am besten langwelliges Licht, allerdings hat sich sein Absorptionsmaximum zu etwas kürzeren Wellenlängen in den grünen Bereich verschoben. Dem verdankt auch der Mensch seinen dritten Zapfentyp, seinen Grünrezeptor.

So groß diese Verbesserung sein mag, ist sie doch nur ein eher schwacher Behelf verglichen mit dem Farbsinn der Vögel und dem vieler Reptilien und Fische mit ihren vier Zapfensorten und ihrem tetrachromatischen Sehen. Überdies können nicht alle Menschen Rot und Grün gut unterscheiden. Vor allem Männer sind betroffen, denn die Gene für beide Pigmente für langwelliges Licht liegen auf dem X-Chromosom, das Männer nur einmal haben. Ist eines dieser Gene nicht in Ordnung, vermag bei Frauen das entsprechende Gen auf dem anderen X-Chromosom den Defekt in der Regel abzufangen. Weil diese Kompensation bei Männern fehlt, sind sie dann rotgrünschwach oder -blind.

Farblupen

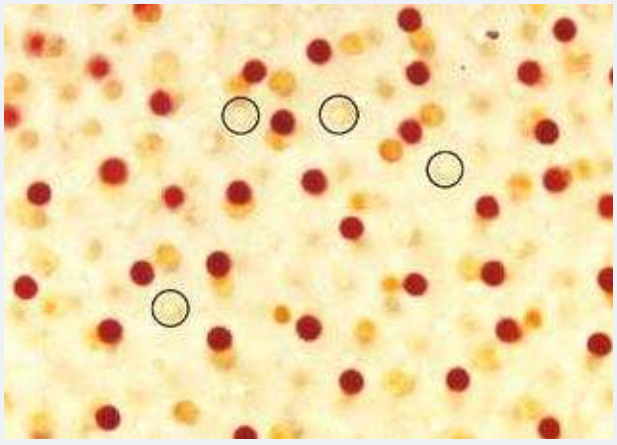
Übrigens ging der Netzhaut in der Frühzeit der Säugetiere noch mehr verloren. Die Zapfen von Reptilien und Vögeln enthalten feine Öltröpfchen (siehe Kasten unten). Bei Säugern sind solche Einschlüsse nicht mehr vorhanden. Viele der Tröpfchen erscheinen uns farbig, denn sie enthalten hohe Konzentrationen von Carotinoiden. Licht muss sie passieren, bevor es auf das Sehpigment trifft. Weil diese Öltröpfchen kürzere Wellenlängen wegfiltern, wird der Spektralbereich eingeschränkt, den ein Sehpigment jeweils absorbiert. Das bedeutet, die Zapfen sind nun für einen schmaleren Ausschnitt hochempfindlich und ihre Absorptionsbereiche überlappen weniger. Dank dessen müssten Vögel, so war zu vermuten, mehr Farben unterscheiden können als ohne diese Öleinschlüsse.

Wie es um ihren Farbsinn wirklich bestellt ist, können wir von diesen Befunden allein aber nicht wissen. Manches lässt sich allerdings mit Verhaltenstests prüfen, bei denen die Vögel zwischen Farben unterscheiden sollen. Bei solchen Versuchen muss der Experimentator unbedingt ausschließen, dass sich der Vogel nach irgendwelchen anderen Merkmalen richtet. Zum Beispiel könnte das Tier allein die Helligkeit zweier Farben bewerten und »richtig« reagieren, obwohl es die Farben selbst gar nicht als unterschiedlich wahrnimmt. Solche Tests zur Farbunterscheidung haben Forscher mit Vögeln schon früher durchgeführt, damals allerdings, ohne an eine UV-Wahrnehmung zu denken. Erst in den letzten Jahrzehnten begannen sie darauf zu achten.

Recht aufschlussreich ist es oft, wenn man reine Spektralfarben gegen Mischfarben setzt und prüft, wann beides dem Tier gleich erscheint. Das haben mein früherer Mitarbeiter Byron K. Butler und ich angewandt, um zu untersuchen, was die vier Zapfentypen für die Wahrneh-

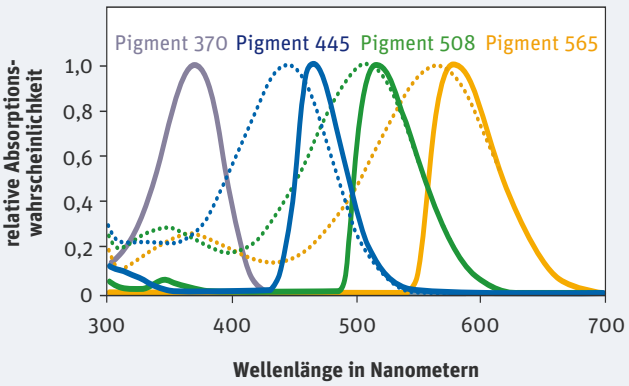
Schärfere Farben durch Ölfilter

Vieles ging den Sehzapfen der Säugetiere verloren. Der bedeutendste Verlust dürfte die Einlagerung von Öltröpfchen gewesen sein. Vogelzapfen enthalten rote, gelbe, fast farblose sowie transparente Öleinschlüsse. Auf dem mikroskopischen Bild von der Netzhaut einer Meise (Foto unten) erkennt man gelbe, rote und farblose Tröpfchen (einige davon hier schwarz umrahmt). Sie alle – abgesehen nur von den total transparenten Tröpfchen – filtern jeweils Licht der kürzeren Wellenlängen, für die ein Pigment empfindlich ist. Hierdurch wird die spektrale Empfindlichkeit von dreien der vier Zapfensorten der Vögel auf die jeweils längeren Wellenlängen eingeengt und teils auch etwas hin zu längeren Wellenlängen verschoben. In der Grafik unten ist deren Absorption ohne den Öltröpfcheneffekt als gepunktete, mit dem Effekt als durchgezogene Linie dargestellt. Wegen der Öltröpfchen können Vögel mehr Farben unterscheiden als sie es ohne solche Einschlüsse könnten.



TIMOTHY H. GOLDSMITH

Filtereffekt durch Öltröpfchen



mung der Vögel bedeuten. Am Beispiel des menschlichen Farbensinns sei das Verfahren beschrieben. Auf ein reines gelbes Licht, das heißt Licht einer einzigen Wellenlänge im Gelbbereich, reagieren unsere beiden Zapfentypen für langwelliges Licht. Die gleiche Gelbempfindung lässt sich aber mit einer passenden Mischung aus rotem und grünem Licht erzielen. Das gelingt, wenn die beiden Zapfentypen hiervon jeweils genauso stark erregt werden wie von dem reinen gelben Licht. Subjektiv können wir dann die Mixtur und die reine Wellenlänge nicht unterscheiden. Unser Gehirn macht aus den beiden physikalisch unterschiedlichen Lichtreizen die gleiche Farbe.

Mit demselben Trick lässt sich das Farbsehen von Vögeln prüfen. Bei welchen Mischverhältnissen würde wohl ihr Unterscheidungsvermögen versagen? Anhand der ermittelten Absorptionseigenschaften der vier Zapfentypen – unter Berücksichtigung des Öltröpfcheneffekts – errechneten Butler und ich, wie man rotes und grünes Licht mischen müsste, damit Vögel darin eine bestimmte Farbe aus dem für uns gelben Bereich des Spektrums sehen. Die Mischung musste schon deswegen für Vögel eine andere sein als für uns selbst, weil die einzelnen Sehpigmente bei ihnen etwas andere Absorptionskurven und -maxima aufweisen als bei uns (siehe Kasten linke Seite). Hinzu kommt der Öltröpfcheneffekt. Diesen Test betrachteten wir als Vorversuch. Wir wollten prüfen, ob unsere Messungen zu den Pigmenteigenschaften und der Wirkung der Öltröpfchen stimmten. Anschließend wollten wir in ähnlicher Weise die Wahrnehmung von UV-Licht untersuchen.

Als Versuchstiere wählten wir Wellensittiche. Die Vögel lernten, dass sie bei gelbem Licht eine Futterbelohnung erhielten. Ein Vogel saß auf einer Stange, und in einem Meter Entfernung leuchteten zwei Lichter auf. Eines davon war das reine Gelb, worauf das Tier dressiert worden war. Das zweite Licht setzte sich aus Rot- und Grünanteilen in unterschiedlicher Mischung zusammen.

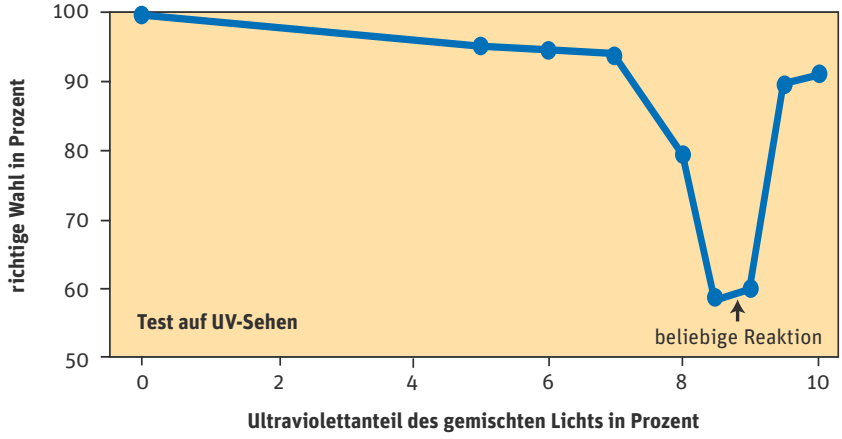
Flog der Wellensittich das gelbe Licht an, gab ein Futterspender einen Leckerbissen ab. Beim anderen Licht erhielt der Vogel nichts. Die Seiten des reinen und

UV-Licht sehen Vögel als Farben – die sich mit anderen Wellenlängen zu Mischfarben kombinieren

des Mischlichts wechselten nach einem Zufallsschema. Auch die Mixturen von Rot und Grün variierten unvorhersehbar. Zudem veränderten wir stets die Intensität des rein gelben Lichts. Wie erwartet wählten die Vögel bei den meisten Mischlichtern unbeirrt das reine gelbe Licht. Nur bei einem Mischungsverhältnis von etwa 90 Prozent Rot und 10 Prozent Grün nahmen sie offenbar keinen Farbunterschied wahr und flogen auch zum Mischlicht. Genau das hatten wir für das gewählte reine Gelb vorausberechnet.

Auf gleiche Weise konnten wir nun die UV-Tüchtigkeit unserer Versuchstiere erproben. Das war ein entscheidender Test, um zu erfahren, ob Vögel ihre UV-Zapfen bei der Farbwahrnehmung mit einbeziehen, ob sie also wirklich tetrachromatisch sehen. Diesmal dressierten wir die Wellensittiche auf ein violettes Licht. Für den Unterscheidungstest mischten wir blaues und nahes UV-Licht, wobei wir für den UV-Anteil ein breites Band von Wellenlängen verwendeten. Wie beim Gelbtest wussten die Vögel fast alle Mischungen klar vom reinen Violett zu unterscheiden. Aber wenn der Blauanteil ungefähr 92 und der UV-Anteil um die 8 Prozent betrug, gelang ihnen das nicht. Da wählten sie beide Lichter fast gleich oft (siehe Bild unten), genau wie von uns für das gewählte Violett vorausgesagt. Hieraus dürfen wir erstens schließen, dass UV-Wellenlängen für Vögel eigene Farben darstellen, und zweitens, dass das Sehsystem der Vögel bei der Farbwahrnehmung die Erregung des UV-Zapfens berücksichtigt. Vögel sind somit echte Tetrachromaten. Zum Farbensehen nutzen sie tatsächlich alle vier Zapfentypen.

Leider können wir nicht nachvollziehen, welche Farbqualitäten Vögel sehen. Sie erkennen ja nicht nur uns verborgene Wellenlängen im nahen UV-Bereich, sondern sie sehen auch von uns nicht erfahrbare Mischfarben. Die vom Menschen unterschiedene Farbpalette stellen Physiologen gern innerhalb eines Dreiecks dar. Für Vögel müsste man eine Dimension hinzufügen und könnte ein mit Farben gefülltes Tetraeder verwenden (siehe Kasten S. 102). Farben, die darin höher als die Grundfläche liegen, sind der menschlichen Wahrnehmung verschlossen. ▷



Wellensittiche können violettes Licht fast immer von Mischlicht mit einem UV-Anteil gut unterscheiden. Nur bei bestimmten Mischungen versagen die Vögel – in diesem Beispiel bei einem UV-Anteil von gut acht Prozent.

▷ Wozu mag den Vögeln wohl eine so bunte Welt nützen? Zunächst fällt selbst unserem Auge auf, wie viel farbenprächtiger Vogelmännchen oft im Vergleich zu den Weibchen ihrer Art erscheinen. Als sich herausstellte, dass Vögel UV-Licht wahrnehmen, begannen Forscher nach Hinweisen zu fahnden, ob solche Farben die Partnerwahl beeinflussen. Das brachte manches verblüffende Ergebnis.

CORBIS, M. HARVEY (NASHORNVOGEL)

Vogelweibchen nutzen die UV-Reflexion des Gefieders von Männchen als Indikator für deren Gesundheit

So untersuchte Muir Eaton, als er an der Universität von Minnesota arbeitete, 139 Vogelarten, deren Männchen und Weibchen für uns völlig gleich aussehen. Eaton maß, welche Wellenlängen das Gefieder dieser Vögel reflektiert. Das aber war bei der Mehrzahl der Arten für die beiden Geschlechter verschieden. Über neun Zehntel der geprüften Arten, folgerte Eaton, müssten schon allein an der Farbe erkennen können, ob sie ein Weibchen vor sich haben oder ein Männchen.

Jene Federn, die ein Vogelmännchen beim Balzen besonders vorzeigt, reflektieren UV-Licht tatsächlich öfter als Federn anderer Körperpartien. Das entdeckten Franziska Hausmann von der Universität Brisbane (Australien) und ihre Kollegen. In einer umfangreichen Studie hatten die Forscher 108 australische Vogelarten geprüft. Untersuchungen in England, Schweden und Frankreich zufolge bevorzugen Blaumeisenweibchen wie auch weibliche Stare bei der Paarung Männchen, deren Gefieder in Vergleichstests die meiste UV-Strahlung reflektiert. Tatsächlich ist das sinnvoll. Wie gut das Gefieder diese Wellenlängen zurückwirft, hängt von der mikroskopischen Feinstruktur der Federn ab. Die wiederum dürfte von der Gesundheit des Tiers beeinflusst sein. Somit könnte das Maß der UV-Reflexion für ein Vogelweibchen einen passablen Indikator für die Gesundheit eines Männchens darstellen. Den vermuteten Zusammenhang bestätigten Amber Keyser von der Universität von Georgia in Athens und Geoffrey Hill von der Auburn-Universität (Alabama) für eine nordamerikanische Vogelart: Die größten Männchen des Blaukardinals oder Azurbischofs *(Guiraca caerulea)*, der mit dem bunten Papstfink (siehe Foto im Kasten unten) verwandt ist, tragen ein Gefieder von einem besonders satten, leuchtenden Blau, dessen Farbe zudem den höchsten UV-Anteil von allen Männchen enthält. Solche Exemplare besitzen auch die größten, somit nahrungsreichsten Reviere. In der Tat füttern sie ihre Jungen öfter als weniger prächtige Männchen.

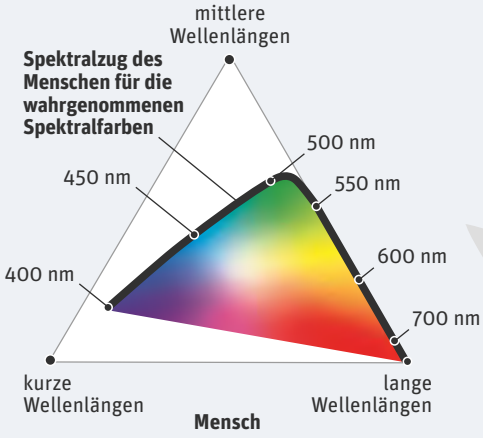
Allgemein dürfte die Fähigkeit, UV-Strahlung sehen zu können, Tieren vielfach die Nahrungssuche erleichtern. Schon vor Jahren wies der Sinnesphysiologe Dietrich Burkhardt von der Universität Regensburg nach, dass die äußere Wachsschicht vieler reifer Beeren und anderer Früchte UV-Licht reflektiert. Der Hintergrund könnte sein,

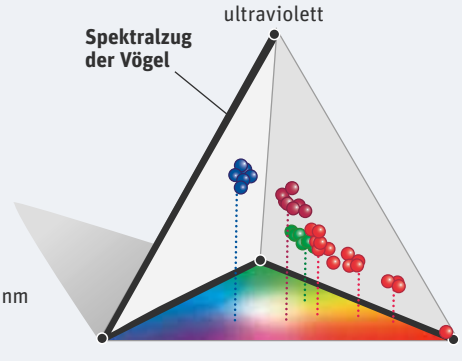
Virtueller Zauber in Farben

Alle vom Menschen wahrgenommenen Farben lassen sich in der Fläche eines annähernden Dreiecks sortieren (Bild ganz links). Die reinen Spektralfarben sind dabei entlang der dicken schwarzen Linie, dem so genannten Spektralzug, angeordnet. Die Mischfarben bis hin zu Weiß finden sich im Innern des Dreiecks.

Um die Farben zu arrangieren, die ein Vogel sieht, benötigt man wegen der UV-Wahrnehmung eine weitere Dimension. Plausibel ist die Anordnung in einem Tetraeder (zweites Bild). Die Farben, die nicht den UV-Rezeptor aktivieren, würden sich am Boden des Tetraeders verteilen. Allerdings lägen sie oft ziemlich am Rand der Fläche – wegen der eingegrenzten Empfindlichkeit der Sinneszellen durch eingelagerte Öltröpfchen.

Interessant wird es, wenn UV-Sehen dazukommt. Im Tetraeder wächst der Anteil an UV-Licht zur Spitze hin. Wie sehen die Weibchen einer in den USA vorkommenden Kardinalart – des Papstfinks (*Passerina ciris*, drittes Bild), englisch »painted bunting« – wohl ihre tuschkastenbunten Männchen? Deren Federkleid reflektiert zusätzlich nahes ultraviolettes Licht, aber nicht etwa an den roten,





CORBIS, ARTHUR MORRIS

Papstfink-Männchen

Auch wenn niemand weiß, wie zum Beispiel Blumen für Vögel aussehen, so regen diese Fotos doch unsere Fantasie an. Andrew Davidhazy vom Rochester-Institut für Technologie (US-Bundesstaat New York) fotografierte den Sonnenhut einmal so, wie wir ihn sehen (links), dann aber mit einer Spezialkamera, die nur im UV-Bereich ablichtet (rechts).

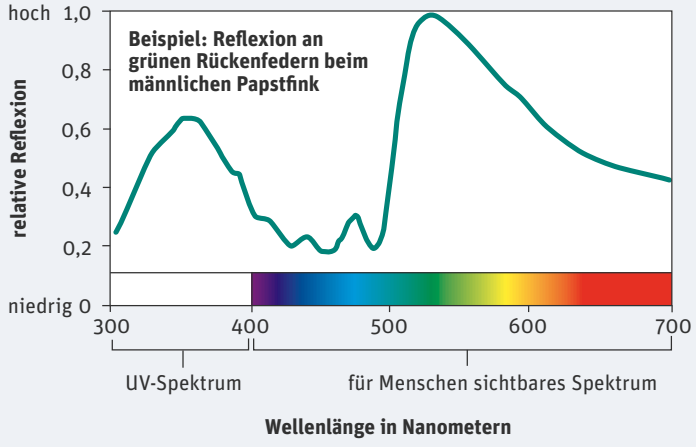
ANDREW DAVIDHAZY, ROCHESTER INSTITUTE OF TECHNOLOGY (RIT)

dass Tiere daran die Reife erkennen und die Samen verbreiten helfen. Doch auch Fleischfressern kann das UV-Sehen nützen. Wie Jussi Viitala von der Universität Jyväskylä (Finnland) und seine Kollegen entdeckten, sehen Turmfalken auf die Weise die Spuren von Wühlmäusen. Viele Nager scheinen mit UV-reflektierendem Harn und Kot Duftspuren anzulegen. Vor allem im Frühjahr, wenn die Vegetation solche Spuren noch nicht verdeckt, erkennen Raubvögel daran offenbar, wo Beute zu erwarten ist.

Oft fragen mich Laien nach dem Nutzen des UV-Sehens der Vögel. Nicht selten klingt dann durch, wie ulkig sie das Phänomen finden, eine reine Spielerei, auf die ein ordentlicher Vogel durchaus müsste verzichten können. Bei aller Fantasie sind wir doch in der Welt unserer Sinne gefangen. Was es bedeutet, das Augenlicht zu verlieren, können wir uns vielleicht vorstellen – und wir fürchten es. Aber eine visuelle Welt jenseits der unseren übersteigt unsere Fassungskraft. Evolutionäre Perfektion – oder was wir in unserer beschränkten, voreingenommenen Sicht dafür halten – ist stets nur eine Laune des Augenblicks. Zu erkennen, dass sich mehr tut, als wir durch unsere Brille wahrnehmen, lehrt Bescheidenheit. ◁

blauen oder grünen Partien jeweils einheitlich viel, sondern in variierenden Mengen. Im Tetraeder symbolisieren das die im Raum stehenden Punktehaufen, die wegen des wechselnden UV-Gehalts etwas streuen, besonders für rote Federn. Das Weibchen dürfte somit nicht einen einfarbigen Kopf oder eine einfarbige Brust wahrnehmen, sondern unterschiedliche Nuancen.

Misst man die Reflexion der grünen Rückenfedern des Papstfinks, erkennt man, dass diese Federn auch im UV-Bereich stark reflektieren (Grafik rechts unten).



Timothy H. Goldsmith ist Professor emeritus für Molekular-, Zell- und Entwicklungsbiologie an der Yale-Universität in New Haven (Connecticut).

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Botschaft im Ultraviolett. Von Georg Pohland und Peter Mullen in: Bild der Wissenschaft 7/2006, S. 45

Farben aus der Vogelperspektive. Von Georg Pohland und Peter Mullen in: Biologie in unserer Zeit, Heft 1/2005, S. 31

Color vision of the budgerigar (Melopsittacus undulatus): Hue matches, tetrachromacy, and intensity discrimination. Von Timothy H. Goldsmith und Byron K. Butler in: Journal of Comparative Physiology A, Bd. 191, Heft 10, S. 933, Oktober 2005

Farben. Spektrum der Wissenschaft – Spezial 5/2004

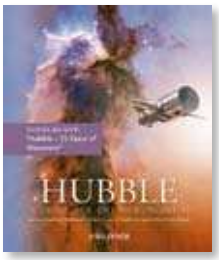
Ultraviolet signals in birds are special. Von F. Hausmann, K. E. Arnold, N. J. Marshall und J. P. F. Owens in: Proceedings of the Royal Society B, Bd. 270, Heft 1510, S. 61, 7. Januar 2003

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/ 858958.

ASTRONOMIE

Reise zu den Sternen – ganz ohne Beamen

Die Bilder der neuen Teleskope – auf der Erde wie im Weltraum – lassen einem die Augen übergehen.



Es ist nicht nur der Untertitel »Unendliche Weiten«, der frühen Folgen der Fernsehserie »Star Trek« entnommen scheint. Auch die grafische Gestaltung des Buchs »Das All!« erinnert uns an die Astronomiebücher, die wir als Jugendliche verschlungen haben.

Die Bilder allerdings sind aktuell – und oft das Beste, was die zahlreichen durch Piktogramme gekennzeichneten Teleskope zu bieten haben. Auch neue Aufnahmen, die Raumsonden eben erst von Mars und Saturn zur Erde gefunkt haben, sind dabei. Das Buch führt Anfänger von der Sonne über die Planeten bis hin zu den fernsten Galaxien. Die Kapitel sind weit gehend unabhängig voneinander, wollen jedoch jedes für sich von vorn bis hinten gelesen werden.

Die erklärenden Texte zu den vorgestellten astronomischen Phänomen sind nicht unproblematisch. Es geht immer zwei flotte Sätze lang alles gut, und dann macht der dritte zum Teil erhebliche Bauchschmerzen: Ungenauigkeiten, schlechte Übersetzungen, Auslassungen bis hin zu der schlichten Behauptung im Glossar, Atomkerne bestünden (nur?) aus Protonen.

Dagegen gibt es inhaltlich an »Hubble« so gut wie nichts zu beanstanden, auch wenn uns der Text dieses Buchs doch immer wieder an den einer Pressemitteilung erinnert. Es ist ein Astronomiebuch aus der »Ich-Perspektive« des Weltraumteleskops, und es tut gut, Hubble auch einmal mit europäischer Stimme sprechen zu hören. Schließlich ist die europäische Weltraumbehörde Esa als Partner der Nasa wesentlich an diesem Erfolgsprojekt beteiligt. Dass bei den Kosten des Weltraumteleskops nur der europäische Anteil angegeben wird, sehen wir Christensen, der im Hauptberuf Pressesprecher der europäischen Koordinierungsabteilung von Hubble ist, augenzwinkernd nach.

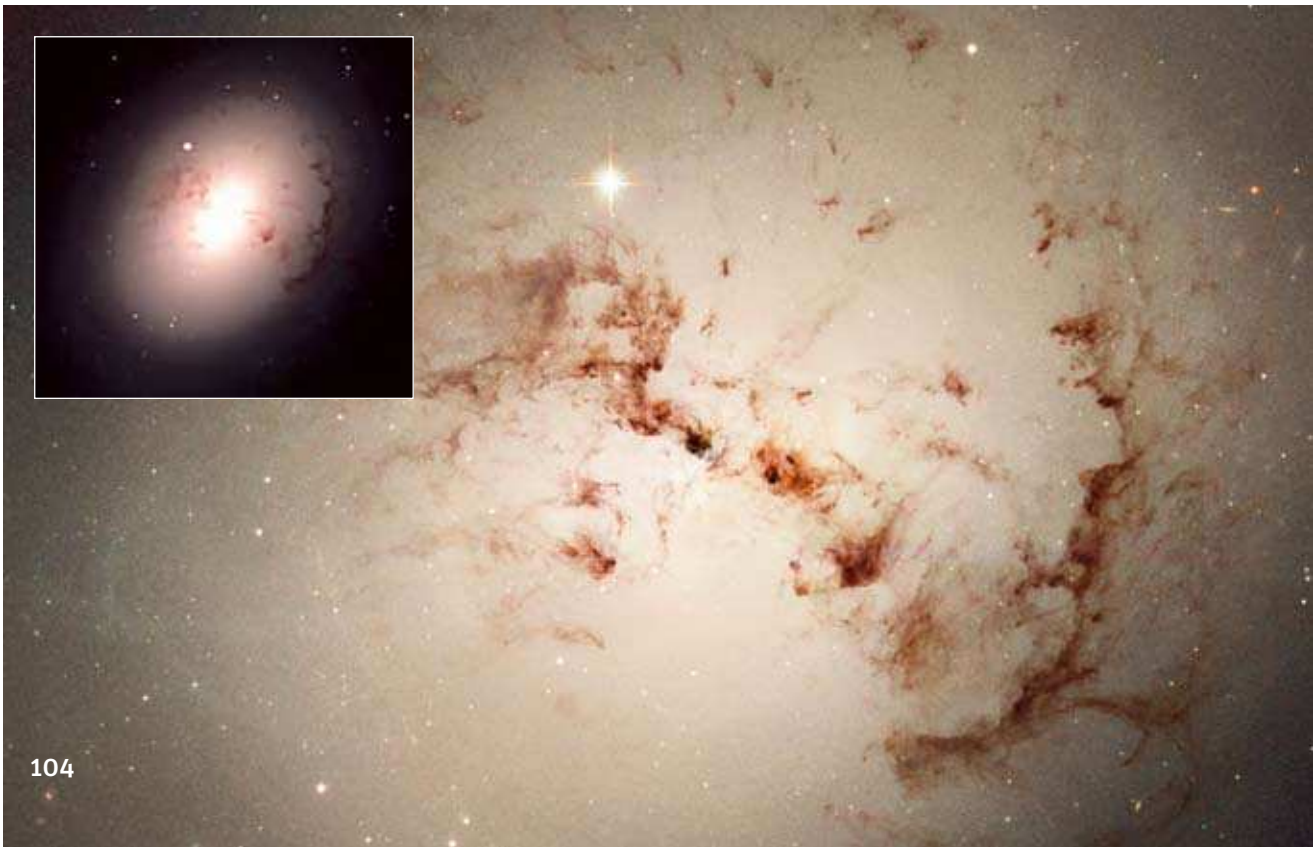
Die wenigen künstlerischen Darstellungen überblättern wir schnell; aber an den Fotos können wir uns nicht satt sehen. An Bilderfülle übertrifft das Buch den »Spektrum«-Artikel (9/2006, S. 36) zum Thema bei Weitem. Wir sehen, wie massereiche Galaxienhaufen als Gravitationslinsen die Bilder ferner Objekte zu filigranen Lichtbögen verzerren und welche Detailfülle von Sternen und Gaswolken die Spiralarme naher Welteninseln in sich bergen. Das Wort »Tiefenschärfe« bekommt da eine ganz neue Bedeutung.

Alice Krüßmann und Götz Hoeppe

Alice Krüßmann ist Bildredakteurin, Götz Hoeppe Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

Mary K. Baumann, Will Hopkins, Loralee Nolletti und Michael Soluri
Das All!
Unendliche Weiten
Vorwort von Stephen Hawking. Herbig, München 2005. 184 Seiten, € 39,90

Lars L. Christensen und Bob Fosbury
Hubble
15 Jahre auf Entdeckungsreise
Mit DVD. Aus dem Englischen von Thomas Lazar. Wiley-VCH, Weinheim 2006. 120 Seiten, € 24,90



Aufnahmen des Weltraumteleskops Hubble (großes Bild) und des Very Large Telescope (kleines Bild) zeigen das Zentrum der riesigen elliptischen Galaxie NGC 1316 in unterschiedlicher Detailfülle.

BIOLOGIE

Kein Glaubensinhalt, sondern Faktum und Theorie

Die Biologen sollten sich intensiver mit den philosophischen Grundlagen ihres Fachs beschäftigen.

Als ich im Dezember 2004 an einer süddeutschen Universität einen Vortrag zum Thema »Moderne Evolutionstheorie und Kreationismus« beendet hatte, konfrontierte mich eine junge Diplombiologin mit dem folgenden Argument: Vor zweihundert Jahren akzeptierten bibeltreue Naturforscher noch göttliche Schöpfungsakte; heute glauben die meisten Biologen an die Evolutionstheorie. Unser Wissen schreitet voran. Was werden die Biologen der Zukunft glauben?

Etwas verärgert antwortete ich sinngemäß wie folgt: Es gibt gläubige Biologen, aber im Beruf werden Glaubensinhalte grundsätzlich ausgeklammert. Die moderne synthetische Evolutionstheorie ist kein Glaubensbekenntnis, sondern ein aus Fakten abgeleitetes System von Aussagen, das einen Prozess erklärt, der tatsächlich stattgefunden hat und andauert. Die junge Biologin nahm diese ihr offensichtlich fremden Sachverhalte mit Verwunderung zur Kenntnis.

Diese Episode zeigt, dass die ausschließliche Vermittlung von Spezialwissen nicht ausreichend ist: Im Grundstudium sollten auch die allgemeinen Prinzipien der Biowissenschaften gelehrt und abgeprüft werden. Da dieses Basiswissen an vielen Universitäten im Lehrplan fehlt, sind Buchveröffentlichungen wie der vorliegende Sammelband von besonderer Bedeutung. Die Hamburger Biophilosophen Ulrich Krohs und Georg Töpfer haben einen Querschnitt dieses großen Gebiets zusammengetragen; namhafte Autoren haben eigens dafür Übersichtsbeiträge verfasst.

In den vier Abschnitten »Biologie und Physikalismus« (wissenschaftstheoretisch-philosophische Fragen), »Organismus« (Lebensbegriff, Definitionen der Biologie), »Biologische Theorien« (Schwerpunkt Evolution) und »Pragmatik« (Schwerpunkt Experimente) sind originelle Einzelbeiträge zu finden, die nicht nur allgemeine Hintergrundinformationen referieren, sondern auch tief gehende Analysen liefern und offene Probleme ansprechen.

Problematisch und teilweise unzutreffend sind aus meiner Sicht die Ausführungen zur Evolutionsbiologie im Abschnitt III. Den Autoren ist offensichtlich nicht bekannt, dass Ende der 1990er Jahre die erweiterte synthetische Theorie der biologischen Evolution entwickelt wurde, die unter anderem die evolutionäre Entwicklungsbiologie (»Evo-devo«), die phänotypische Plastizität und das Konzept der Endosymbiose umfasst und in der englischsprachigen Fachliteratur mehrfach zusammenfassend dargestellt wurde (zum Beispiel von mir selbst gemeinsam mit K. J. Niklas in »Naturwissenschaften«, Bd. 91, S. 255, 2004).

Unter den Autoren finden sich kaum praktizierende Biologen. Dies erklärt die stellenweise recht abstrakte, weit vom lebenden Objekt entfernte Behandlung der deskriptiven und der experimentellen Biowissenschaften. Um dieses Defizit auszugleichen, empfehle ich die biophilosophischen Werke des Evolutionsforschers und Wissenschaftshistorikers Ernst Mayr (1904 – 2005), der zeitlebens Naturalist (Freilandbiologe) und Theoretiker (Interpret wissenschaftlicher Fakten) war (Spektrum der Wissenschaft 2/2001, S. 98, und 12/2004, S. 98). Auch der elegante, leicht verständliche Reclam-Band »Biophilosophie« von Gerhard Vollmer (1995) ist hilfreich. Es tut der Qualität seines Werks keinen Abbruch, dass Vollmer nicht Biologe, sondern Physiker und Wissenschaftstheoretiker ist (und in dem vorliegenden Band nicht zitiert wird).

Trotz dieser Kritik kann ich die »Philosophie der Biologie« nachdrücklich empfehlen. Viele Konzepte und Ideen zur Biophilosophie gibt es in keiner anderen Quelle in dieser Form nachzulesen. Die ausführlichen Literaturverzeichnisse am Ende jedes Einzelkapitels ermöglichen den Einstieg in die Spezialliteratur und bilden eine moderne, hoch aktuelle »Bibliografie zur Biophilosophie«.

Ulrich Kutschera

Der Rezensent ist Professor für Pflanzenphysiologie und Evolutionsbiologie an der Universität Kassel.

Ulrich Krohs und Georg Toepfer (Hg.)
Philosophie der Biologie
Eine Einführung
Suhrkamp, Frankfurt am Main 2005.
457 Seiten, € 16,–

Als Abonnent haben Sie viele Vorteile

1. Sie sparen gegenüber dem Einzelkauf und zahlen pro Heft nur € 6,30 statt € 6,90. Als Schüler, Student oder Azubi zahlen Sie sogar nur € 5,45.

2. Sie haben online freien Zugang zu allen Spektrum-Ausgaben seit 1993 mit derzeit über 6000 Artikeln.

3. Unter www.spektrum-plus.de finden Sie jeden Monat einen kostenlosen Zusatzartikel, der nicht im Heft erscheint.

4. Sie erhalten für Ihre Bestellung ein Dankeschön Ihrer Wahl.

5. Sie können die Online-Wissenschaftszeitung »spektrumdirekt« günstiger beziehen.

Zum Bestellen einfach nebenstehende Karte ausfüllen und abschicken
oder per Internet: **www.spektrum.de/abo**
per Telefon: 06221 9126-743
per Fax: 06221 9126-751
per E-Mail: service@spektrum.com

Abonnieren oder Verschenken

Wenn Sie **Spektrum der Wissenschaft** selbst abonnieren oder verschenken, bedanken wir uns bei Ihnen mit einem Präsent. Wenn Sie ein Geschenkabo bestellen, verschicken wir das erste Heft zusammen mit einer Grußkarte in Ihrem Namen.

Buch »Was macht das Licht wenn's dunkel ist?«
Hier beantworten Experten Fragen, die wir schon immer einmal stellen wollten.

Leser werben Leser

Sie haben uns einen neuen Abonnenten vermittelt? Dann haben Sie sich eine Dankesprämie verdient!

Universalgutschein BestChoice
Einlösbar bei bis zu 100 Anbietern wie z. B. Amazon, IKEA, Douglas, OBI oder WOM. Umtausch gegen Bargeld ist ausgeschlossen.

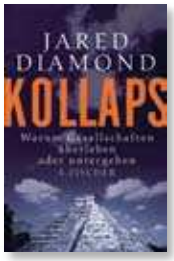
Recherchieren und Archivieren

Jahres-CD-ROM
Die Spektrum CD-ROM enthält den kompletten Inhalt (inklusive Bilder) des Jahrgangs 2006 von Spektrum der Wissenschaft in PDF-Version. Zur besseren Nutzung Ihres Heftarchivs finden Sie auf der CD zusätzlich eine Registerdatenbank von 1978 bis 2006 (nur für Windowssysteme).

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH | Slevogtstr. 3–5 | 69126 Heidelberg | Telefon 06221 9126-600 | Telefax 06221 9126-751 | www.spektrum.de | Geschäftsführer: Markus Bossle, Thomas Bleck | Amtsgericht Heidelberg | HRB 338114 | Abonnementsverwaltung: ZENIT Pressevertrieb GmbH | Julius-Hölder-Str. 47 | 70597 Stuttgart | Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

ÖKOLOGIE

Hängt eine Gesellschaft wirklich an ihren Wäldern?



Jared Diamond ist in seiner Analyse vielleicht etwas einseitig, aber gleichwohl aufschlussreich.

Der amerikanische Geograf, Genetiker und Anthropologe Jared Diamond hat vor einigen Jahren die Erforschung der Geschichte der menschlichen Zivilisation revolutioniert – mit seinem Buch »Arm und Reich«, das den Entwicklungsvorsprung der Gesellschaften Asiens und Europas auf ihre privilegierten ökologischen Ausgangsbedingungen am Ende der letzten Eiszeit zurückführt. Auf ein nicht weniger ehrgeiziges Unterfangen hat sich Diamond mit seinem jüngsten Buch eingelassen: nämlich in allen Einzelheiten zu erklären, warum Gesellschaften immer wieder zerstörerisch bis zur Bedrohung der eigenen Existenz in ihre Umwelt eingreifen – und warum manche Gesellschaften solche schweren ökologischen Krisen überstehen, andere aber nicht.

Im 17. Jahrhundert wuchs Japans Wirtschaft ebenso rapide wie seine Bevölkerung, und das Land geriet in die schwerste Umweltkrise seiner Geschichte. Bis Mitte des 16. Jahrhunderts hatte es ein Viertel seines Territoriums abgeholzt; nur 150 Jahre später hatte der Raubbau derart verheerende Ausmaße angenommen, dass die Wälder bis auf einige klägliche Überbleibsel vollständig vernichtet waren. Schuld daran war der ungeheure Holzbedarf in der Blütezeit der Tokugawa-Dynastie. Holz wurde gebraucht für die Salz- und Hüttenindustrie und den Bau von Schiffen, Städten und Schlossanlagen. Holz diente als Brennstoff für die Öfen und Herde. Hinzu kam, dass die Landwirtschaft immer mehr Acker- und Weideland benötigte und dass die Bauern fast ausschließlich Dünge- und Futtermittel verwendeten, die aus den Wäldern stammten. Mit fortschreitender Waldzerstörung gingen auch die landwirtschaftlichen Erträge zurück, und es kam immer wieder zu Hungersnöten.

In dieser katastrophalen Lage beschlossen der japanische Herrscher, der Shogun, und die Regionalfürsten, die Daimyos, den Holzverbrauch auf ein Minimum zu reduzieren und die Regeneration und Aufforstung der Wälder voranzutreiben. Ein ausgeklügeltes Forstverwaltungssystem regelte bis ins letzte Detail, wer wo wann wie viel, wofür und zu welchem Preis Holz nutzen durfte. In allen Wäldern patrouillierten Wächter, die das illegale Fällen von Bäumen mit Waffengewalt verhinderten. An allen Landstraßen und Flüssen standen Wachposten, die jeden Holztransport gründlich inspizierten. Kohle wurde als Ersatzbrennstoff verwendet. An die Stelle der traditionellen klobigen Holzhäuser traten grazile, aus Leichtbauelementen errichtete, und die Ofenheizungen wurden durch tragbare Kohlebecken ersetzt. Und um die Landwirtschaft zu entlasten, intensivierte man die Fischerei, dehnte sie auf die Tiefsee aus und erfand neue Fangmethoden.

Dass es Japan schließlich gelang, seinen Untergang abzuwenden, führt Jared Diamond auf mehrere günstige Umstände zurück. Die Böden des Inselstaats sind jung, empfangen reichlich Regen und Vulkanasche und werden zusätzlich durch eingewehten Staub vom asiatischen Festland mit Nährstoffen versorgt. Außerdem gab es in Japan keine Ziegen- oder Schafhaltung. Und die Waldbewirtschaftung war so organisiert, dass sie nicht nur den Interessen der Herrschenden, sondern auch denen der Bauern, Dorfvorsteher und Kaufleute diente.

Ökologische Rettung – oder Katastrophe

Die entsprechende Krise auf der Osterinsel fand kein so gutes Ende. Als sich zu Beginn des 10. Jahrhunderts polynesische Auswanderer dort niederließen, fanden sie paradiesische Verhältnisse vor. Einige Jahrhunderte später jedoch waren die einst üppigen Nahrungsquellen nahezu versiegt. Alle einheimischen Landvogelarten waren ausgerottet worden, und von den Seevogelarten hatte eine einzige überlebt. Die Jagd auf Delfine, Robben oder Meeresschildkröten war nicht mehr möglich, denn für den Bau von Kanus fehlte das Holz. Andere Meeresfrüchte wurden kaum noch erbeutet, und den wesentlichen Teil der fleischlichen Nahrung lieferten Hühner und Ratten. Die Erträge der Nutzpflanzen verringerten sich, weil die Böden immer mehr verkarsteten und erodierten. Vergebens versuchten die Inselbewohner durch Steingartenkulturen mit gigantischem Aufwand die landwirtschaftliche Produktion zu steigern. Schuld an der ganzen Misere war der exzessive Holzverbrauch, der mit der restlosen Vernichtung der Wälder endete.

Die Bewohner der Osterinsel fällten die Bäume nicht nur, um sie zu verfeuern, Boote zu bauen oder Ackerland zu gewinnen. Aus Baumstämmen stellten sie die Schlitten, Schienen, Hebel und Seile her, mit denen die tonnenschweren Monumentalstatuen vorwärtsbewegt und aufgerichtet wurden. Und indem die Sippen und Häuptlinge einander im Bau immer kolossalerer Statuen und Plattformen zu übertrumpfen versuchten, verschleuderten sie die letzten Ressourcen.

Dass die Osterinsel-Gesellschaft ihrem eigenen Untergang tatenlos zusah, hat laut Diamond im Wesentlichen drei Gründe: Die herrschenden Kasten hatten sich in ruinöse Macht- und Prestigekämpfe verstrickt; wegen der Abgeschiedenheit der Insel konnten die Bewohner weder auswandern noch sich dringend benötigte Ressourcen durch Handel oder Krieg von anderen Gesellschaften beschaffen; drittens war ihre Umwelt ohnehin äußerst empfindlich. Da die Insel arm an Niederschlägen ist und ihr kaum neue, von außerhalb stammende Nährstoffe zugeführt werden, konnte sie ihre Entwaldung und Auslaugung nicht verkraften.

Es ist immer wieder verblüffend, was Diamond zu Tage fördert, indem er Gesellschaften der Gegenwart und der Vergangenheit in Bezug auf Dutzende von Ausgangsvariablen miteinander vergleicht – auch wenn sein Bestseller bereits jetzt intensiven Widerspruch ausgelöst hat (Spektrum der Wissenschaft 12/2006, S. 38). Merkwürdig ist nur, dass in fast allen seiner Fallanalysen die Zerstörung der Wälder und ihre unmittelbaren Folgeschäden im Zentrum stehen. Außerdem ist es fragwürdig anzunehmen, die Gesellschaften der Gegenwart könnten Entscheidendes aus dem ökologisch bedingten Niedergang der Kultur der Maya, Anasazi oder Normannen lernen.

Gleichwohl ist dies eines der aufschlussreichsten Bücher über die Vorgeschichte, die Geschichte, die Ursachen und die Auswirkungen der Umweltzerstörung überhaupt.

Frank Ufen

Der Rezensent ist freier Wissenschaftsjournalist in Marne.

Jared Diamond

Kollaps

Warum Gesellschaften überleben oder untergehen

Aus dem Amerikanischen von Sebastian Vogel. S. Fischer, Frankfurt am Main 2005. 704 Seiten, € 22,90.
Taschenbuchausgabe: S. Fischer Taschenbuchverlag, Frankfurt am Main 2006, € 9,95

ZUKUNFT DER ERDE

Nimmermüdes Mahnen

Gut drei Jahrzehnte nach ihrem ersten umstrittenen Buch wagen die Autoren einen neuen Ausblick – doch diesmal deutlich vorsichtiger.

Die »Grenzen des Wachstums« haben schon 1972 die Gemüter erregt. Manche sahen darin ein verkanntes Meisterwerk, andere ein Paradebeispiel für übertriebene Ängste von Umweltfanatikern. Die düsteren Prognosen von damals sind nicht eingetroffen – weil sie von vornherein falsch waren, sagen die einen, weil die Warnungen von damals ihre Wirkung getan haben, sagen die anderen.

Bereits 1992 korrigierten die drei Wissenschaftler in »Die neuen Grenzen des Wachstums« einige ihrer plakativen Prognosen. Dieser Trend setzt sich in ihrem aktuellen Buch fort. Mehrfach betonen sie, lediglich mögliche Szenarien zu entwerfen, um auf strukturelle Mängel aufmerksam zu machen. Aber dem moderateren Ton zum Trotz sehen sie ihre Grundthese erhärtet: Da die Ressourcen der Erde begrenzt sind, steuert die Menschheit mit ihrem unkontrollierten Wachstum auf ein Chaos zu.

Damals arbeiteten die drei Autoren am renommierten Massachusetts Institute of Technology (MIT). Heute ist Jørgen Randers Professor für Politische Analyse an der Norwegian School of Management, Dennis Meadows leitet das Institut für Politik und Sozialwissenschaften an der Universität von New Hampshire, und seine Frau Donella ist 2001 während der Arbeit an dem aktuellen Buch gestorben.

Am Anfang der Darstellung steht die klassische Weisheit des Thomas Malthus (1766 – 1834): Wächst der Bedarf exponentiell, die Ressourcen aber nur linear, muss es früher oder später zur Katastrophe kommen. Ressourcen wie fruchtbare Böden, Weideland, Trinkwasser, Wälder und Wildtiere regenerieren sich bei maßvoller Nutzung. Dagegen können die Vorräte an fossilen Brennstoffen oder Bodenschätzen immer nur abnehmen, auch wenn diese Abnahme in der Praxis kaum wahrzunehmen ist. Ein Rohstoff wie Kupfer ist nicht plötzlich erschöpft, sondern unterhalb einer gewissen Ergiebigkeit lohnt sich der Abbau finanziell nicht mehr. Steigende Preise und verbesserte Techniken verschieben diese Grenzen, beliebig fortsetzen lässt sich solch eine Entwicklung aber nicht.

Auch die natürlichen Senken für Schadstoffe sind in ihrer Kapazität begrenzt, und wieder sind die Grenzen nur unscharf oder verspätet zu erkennen. Griffiges Beispiel der Autoren sind die PCBs (polychlorierten Biphenyle). Durch ihre schlechte Wasser- und

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: www.science-shop.de
per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de
telefonisch: 06221 9126-841
per Fax: 06221 9126-869

WÄRE DIE EVOLUTION A
VERLAUFEN, KÖNNTEN
JETZT NICHT LESEN.

Zufall Mensch – Warum der Homo Sapiens auch einen Rüssel und Stoßzähne haben könnte.

Das Mitmach-Web – Warum immer mehr Menschen sich online entblößen.

Da haben wir den Salat – Das Gemüse enthält so viele Nährstoffe wie ein Blatt Papier.

gute Fettlöslichkeit reichern sich diese Chemikalien über Jahrzehnte in der Nahrungskette an; erst dann werden sie Mensch und Tier gefährlich.

Da Bevölkerungszahl, ökologische Belastung, Nahrungsmittel- und Energiebedarf sowie weitere Variable sich in äußerst unübersichtlicher Weise beeinflussen, gestaltet sich eine Prognose über die globale Entwicklung komplex und schwierig. Die Autoren verwenden für das Herzstück ihrer Arbeit eine Weiterentwicklung ihres Computermodells »world3«. Komplexe Zusammenhänge werden in 200 mathematische Gleichungen übertragen und diese für den Zeitraum 1900 bis 2100 jeweils im Abstand von sechs Monaten ausgerechnet. So ergibt sich für jedes Szenario eine Datenflut von 80 000 Zahlenwerten.

Insgesamt berechneten die Wissenschaftler elf verschiedene Szenarien. So zeigen sie, wie sich einzelne Veränderungen im System auf andere Variable auswirken.

Das Gesamtbild ist abermals recht düster. Ohne einen Übergang zur nachhaltigen Nutzung aller Quellen und Senken, eine Begrenzung der Bevölkerungszahl und nicht zuletzt ein Umdenken in Bezug auf Wohlstand werde es zu einem Zusammenbruch kommen. Die Bewohner der Industrienationen sollten ihre Bedürfnisse senken, und dieser gesenkte Maßstab müsse wiederum für alle Menschen gelten.

Gerade der letzte Punkt offenbart die Schwächen des Buchs. Die Analysen und Kritiken sind interessant und in ihrer Konsequenz nicht zu unterschätzen. Allerdings trennen die Autoren sie nicht scharf genug von ihren politischen und subjektiven Urteilen. In manchen Fällen stört der erhobene Zeigefinger nur den Lesefluss, an anderer Stelle werden wichtige Fakten unterschlagen. Es ist richtig, dass die Wasserqualität des Rheins erheblich verbessert werden konnte. Etwas ganz anderes ist es aber, wenn 1996 als Beweis der erste Lachs im Oberrhein gefeiert wird, die Millionen eingesetzter Jungfische aber ungenannt bleiben.

An anderer Stelle wird die nukleare Technik pauschal verdammt und als größte Bedrohung der Menschheit klassifiziert. Und die biologische Landwirtschaft sei grundsätzlich finanziell ertragreicher als die konventionelle. Solch strittige Thesen können nicht ohne Erklärung oder Quellenangabe stehen bleiben.

Wichtige Begriffe wie die »Ökobilanz« werden nicht erklärt, stattdessen folgt an dieser Stelle ein pathetisches Plädoyer für Keramiktassen statt Plastikbecher. Der fachlich Versierte empfindet Letzteres als überflüssig, dem Laien müsste hingegen die Ökobilanz erklärt werden.

Äußerst gelungen ist hingegen das Kapitel über das Ozonloch. Dies zeigt, dass sich die Menschheit durchaus ihrer Grenzen bewusst werden kann und willens ist, sie zu berücksichtigen. Auch weil die Warnungen deutlich differenzierter geworden sind, hat »Grenzen des Wachstums« nichts von seiner Brisanz eingebüßt.

Stefan Keilmann

Der Rezensent hat Germanistik und Philosophie studiert und lebt als freier Wissenschaftsjournalist in Ludwigshafen.

Donella Meadows, Jørgen Randers, Dennis Meadows
Grenzen des Wachstums
Das 30-Jahre-Update
Signal zum Kurswechsel
Aus dem Englischen von Andreas Held.
Hirzel, Stuttgart 2006. 350 Seiten, € 29,–

NDERS SIE DAS

Die Akte Medici – Mediziner entlocken den Fürstengräbern ihre letzten Geheimnisse.

DIE NEUE SICHT DER DINGE. JETZT AM KIOSK.

CHEMIE

Dr. Oetkers neue Warenkunde

Georg Schwedt liefert eine Mischung aus alten Geschichten und neuer Lebensmittelchemie.

Was ist Carrageen? Welche Aufgabe erfüllen Maltodextrine? Was verbirgt sich hinter der Nummer E 270? Was hat man von Phenoxyethanol zu befürchten?

Georg Schwedt, Professor für Analytische und Anorganische Chemie an der TU Clausthal, möchte mit seinem Werk dem interessierten Laien die Zusammensetzung von Lebensmitteln, Kosmetika und Reinigungsmitteln anschaulich darlegen. Damit daraus nicht nur eine spröden Auflistung von Fakten wird, überlässt er im Buch das Recherchieren und Erklären den Mitgliedern einer vierköpfigen Familie, die er einen Tag lang von den Mahlzeiten bis hin zur Körperpflege begleitet. Die Akteure sind: Anna, eine bewusste Verbraucherin, die gerne und viel hinterfragt, ihr Ehemann Peter, Experte in Sachen Chemie, Tochter Claudia, ebenfalls immer auf der Suche nach Antworten, und die unverdorbene Tante Emma vom Land.

Exemplarisch für die unmöglich in einem Buch zu erfassende Vielzahl an Lebensmitteln und Bedarfsgegenständen bespricht Schwedt die Produkte, die das Familienquartett im Verlauf des Tages konsumiert. Zum Beispiel das Mittagessen: Anna serviert als Vorspeise Kartoffelsuppe, als Hauptgang Kartoffelrösti und zum Nachtisch Vanillecreme – natürlich alles Fertiggerichte aus dem Supermarkt. Für die einzelnen Produkte – insgesamt werden im Buch 52 vorgestellt – führt der Autor zunächst eine Zutatenliste auf, die anschließend erläutert wird. So erfährt der Leser, dass in der Creme neben 14 weiteren Inhaltsstoffen das Verdickungsmittel (der Wasser bindende Stoff) Carrageen enthalten ist, der natürlicherweise in Rotalgen vorkommt und aus Galactose-Bausteinen mit sauren Sulfatgruppen besteht.

Unweigerlich kommt es bei den Inhaltsstoffen zu Wiederholungen. In diesen Fällen verweist Schwedt auf bereits gegebene Erklärungen, allerdings sehr mangelhaft, oftmals ohne die Angabe der entsprechenden Seitenzahlen. Um die Erklärungen zu den jeweiligen Zutaten verstehen zu können, braucht man ein solides chemisches Grundverständnis.

Bei den Definitionen und Erklärungen bleibt Schwedt stets neutral. Er bietet somit keine Angriffsfläche für Diskussionen um die häufig eingesetzten und oft umstrittenen Zusatzstoffe in Fertigprodukten.

Merkwürdigerweise füllt die Chemie nur die Hälfte des Buchs; die andere besteht aus Historischem. Über lange Strecken erzählt der Autor beispielsweise die Geschichte des Supermarkts oder die unterschiedlichen Verfahren zur Gewinnung von Stärke. In diesen Zusammenhängen zitiert er seitenweise aus Nachschlagewerken wie »Dr. Oetkers Warenkunde« von 1934 oder »Johnstons Chemie des täglichen Lebens« von 1882 – Inhalte, die der Leser unter diesem Buchtitel so nicht erwartet und die sich manchmal recht zäh lesen.

Dass der Text in anderer Hinsicht nicht mehr aktuell ist, kann dem Autor nicht zum Vorwurf gemacht werden. Das mehrfach zitierte Lebensmittel- und Bedarfsgegenständegesetz (LMBG) wurde im September 2006 durch das europaweit geltende Lebensmittel-, Bedarfsgegenstände- und Futtermittelgesetzbuch (LFGB) abgelöst. Doch der Schaden hält sich in Grenzen. Inhaltlich gab es keine gravierenden Änderungen.

Fazit: Die durch den Titel nahegelegte Annahme, es handele sich um eine Art Nachschlagewerk für den Hausgebrauch, wird nur zur Hälfte erfüllt. Auch hätte Schwedt als Experte an einigen Stellen ruhig mehr Kritik zulassen können, einfach um dem unwissenden und oftmals verunsicherten Verbraucher ein bisschen Hilfestellung zu leisten.

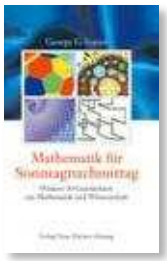
Susanne Gellweiler

Die Rezensentin ist Diplombiologin und freie Wissenschaftsjournalistin in Wiesbaden.

Georg Schwedt
Was ist wirklich drin?
Produkte aus dem Supermarkt
Wiley-VCH, Weinheim 2006.
231 Seiten, € 24,90

MATHEMATIK

Und es geht doch: Mathematik zum Vernaschen

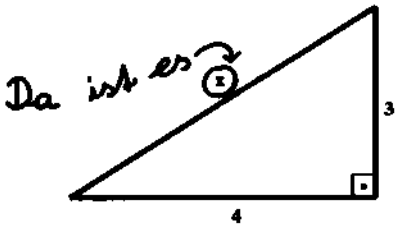


Zwei Autoren präsentieren kleine Leckereien aus der Küche der Abstraktion – in unterschiedlichen Geschmacksrichtungen.

Trauma trostloser Schulstunden, Schrecken der Schriftsetzer – wegen der ausladenden Formeln –, Abgrund der Abstraktion: Dieses unglaublich unverdauliche Zeug soll, zu kleinen Appetithäppchen verarbeitet, dem unbelasteten Leser zu vergnüglichem Konsum serviert werden? Da wird selbst den Vertretern des Fachs mulmig – von den Journalisten ganz zu schweigen –; bestehen sie doch darauf, dass Mathematik zwar im Prinzip jedermann zugänglich sei, aber ihre wahre Schönheit erst dem enthülle, der sich intensiv mit ihr einzulassen bereitfinde.

Zwei Tageszeitungen haben es dennoch gewagt – und gewonnen. In der »Neuen Zürcher Zeitung« erscheint jeden Sonntag »George Szpiros kleines Einmaleins« und findet so großen Anklang, dass die erste Zusammenfassung dieser Geschichten binnen zwei Jahren bereits die 4. Auflage erlebt und der zweite Sammelband dem ersten auf dem Fuße folgt. In der »Welt« musste die Kolumne »Fünf Minuten Mathematik« von Ehrhard Behrends zwar inzwischen einer physikalischen Schwester Platz machen; aber während ihrer zweijährigen Lebensdauer sind hundert Beiträge zusammengekommen.

Wie sagt man die schwierigen Dinge so einfach, dass das Publikum in fünf Minuten das Wesentliche mitbekommt? Die beiden Autoren haben das Problem auf sehr unterschiedliche Weise gelöst, was mit ihren Berufswegen zusammenhängen mag. Während



So muss man sich beim Pisa-Test die Lösung der Aufgabe »Finde x in diesem rechtwinkligen Dreieck« vorstellen (aus »Fünf Minuten Mathematik«).

Ehrhard Behrends ein richtiger Mathematikprofessor an der Freien Universität Berlin ist, fand George G. Szpiro nach seiner Promotion und einigen Jahren Universitätstätigkeit, dass der »akademische Elfenbeinturm nicht sein Ding ist, ebenso wenig wie die Arbeit als Unternehmensberater« (so auf seiner Website www.georgeszpiro.com). Stattdessen wurde er Israel-Korrespondent der »Neuen Zürcher Zeitung«, und seine mathematischen Texte schreibt er abends, als Erholung von den meistens unerfreulichen Dingen, über die er tagsüber für seine Zeitung zu berichten hat.

Das heißt nicht, dass er die schwierigen Themen scheut. Szpiro schreibt über so ziemlich alles, was in den letzten Jahren in der Mathematik Schlagzeilen machte: die Poincaré'sche Vermutung (richtig, diejenige, für deren Beweis Perelman die Fields-Medaille nicht haben wollte), die Lösung des Apfelsinenpackproblems (der Kepler'schen Vermutung) durch Thomas Hales, Fragen, für deren Beantwortung das Clay Institute of Mathematics seine Millionenpreise ausgesetzt hat, und vieles mehr. Natürlich kann man eine derartige Jahrhundertarbeit nicht einmal annähernd auf ein paar formellosen Textseiten wiedergeben. Aber Szpiro gelingt es, eine wesentliche Idee dahinter zu vermitteln.

Für sein Werk hat die Deutsche Mathematiker-Vereinigung (DMV) Szpiro am 10. November 2006 den großen Medienpreis verliehen. In seiner Dankesrede gestand der Preisträger freimütig ein, dass er für seine mathematischen Texte gegen jedes der drei Gebote »die Wahrheit, die ganze Wahrheit und nichts als die Wahrheit« verstoßen musste, und das weit mehr, als es im politischen Journalismus erlaubt ist. Aber ein bisschen Ungenauigkeit ist unvermeidlich, sachfremde Anekdoten erfreuen den Leser, und die ganze Wahrheit will er ohnehin nicht wissen.

In diesen Rahmen passen auch Geschichten, deren Hauptthema Personen sind, wie die streitsüchtige Familie Bernoulli, die esoterischen Neigungen des Isaac Newton, der sich zu einer – durch Zeitablauf widerlegten – Prognose für das Datum des Weltuntergangs hinreißen ließ, oder ein Mathematiker, der zwar viele Arbeiten zur Kombinatorik veröffentlicht hat, aber gar nicht existiert. Hinter dem Namen Shalosh B. Ekhad von der Rutgers-Universität in New Brunswick (New Jersey) verbirgt sich ein Computerprogramm zum Finden mathematischer Beweise.

Neben den charmanten Plaudereien Szpiros wirken die Artikel von Ehrhard Behrends zunächst eher hausbacken. Aber der Eindruck verfliegt, sowie man sich auf die Absichten des Autors einlässt. Behrends will nicht in erster Linie über Mathematik schreiben, sondern gemeinsam mit dem Leser Mathematik treiben – in dem Zeitrahmen von fünf Minuten.

An fantasievoll gewählten Beispielen gewinnt man ein Gefühl für große Zahlen. Wenn irgendwo an der 140 Kilometer langen Autobahn von Berlin nach Cottbus ein zentimeterdicker Stab steht, und Sie werfen irgendwann während der Fahrt mit verbundenen Augen ein Centstück aus dem Fenster – wie groß ist Ihre Chance, den Stab zu treffen? So groß wie die Chance auf sechs Richtige im Lotto. Wenn aber mehrere Tage lang die ganze Autobahn Stoßstange an Stoßstange mit blinden Münzwerfern gefüllt ist, trifft bestimmt einer.

Die Bewältigung des Unendlichen zählt zu den faszinierendsten Errungenschaften der Mathematik. Behrends zeigt uns das wichtigste Werkzeug dafür, das Induktionsprinzip, und wendet es an einem einfachen Beispiel an. Das geht tatsächlich in fünf Minuten, wenn man sich ein bisschen beeilt.

Es ist dem Autor ein dringendes Anliegen zu zeigen, dass Mathematik nicht nur intellektuell faszinierend und für das Verständnis der Welt unentbehrlich, sondern auch schlicht nützlich ist. Da dürfen Artikel über Computertomografie, sichere Verschlüsselung, *fuzzy logic* und Finanzmathematik nicht fehlen.

Und ein richtiger Mathematiker will einen vollständigen Gedankengang von Anfang bis Ende präsentieren und nicht zwischendurch aus Platzmangel auf wolkige Andeutungen ausweichen. Deswegen hat Behrends bei der Zusammenstellung seiner Artikel zum Buch allerlei nachgetragen, was in der Kolumne keinen Platz hatte – wodurch der Gesamtumfang auf mehr als das Doppelte angewachsen ist. Ich kann ihn so gut verstehen.

Christoph Pöppe

Der Rezensent ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

George G. Szpiro
Mathematik für Sonntagmorgen
50 Geschichten
aus Mathematik und Wissenschaft
Verlag Neue Zürcher Zeitung,
4. Auflage, Zürich 2006. 240 Seiten, € 25,–

George G. Szpiro
Mathematik für Sonntagnachmittag
Weitere 50 Geschichten
aus Mathematik und Wissenschaft
Verlag Neue Zürcher Zeitung,
Zürich 2006. 240 Seiten, € 26,–

Ehrhard Behrends
Fünf Minuten Mathematik
100 Beiträge der Mathematik-Kolumne
der Zeitung DIE WELT
Vieweg, Wiesbaden 2006. 256 Seiten, € 22,90

Preisausschreiben

Auf der Jahrestagung der Astronomischen Gesellschaft in Würzburg im September 2007 wird der

Hanno-und-Ruth-Roelin-Preis für Wissenschaftspublizistik

zum zweiten Mal vergeben. Mit diesem Preis wird ein(e) Wissenschaftler(in) oder ein(e) Wissenschaftspublizist(in) ausgezeichnet, der/die **neue Erkenntnisse aus der Astronomie und Weltraumforschung** einer breiteren Öffentlichkeit besonders erfolgreich vermittelt hat. Es können auch in didaktisch-pädagogischer Absicht verfasste Darstellungen ausgezeichnet werden. Es sind Publikationen aller Art zugelassen (Druck, Rundfunk, Fernsehen, Internet ...).

Der Preis wird vom Max-Planck-Institut für Astronomie, Heidelberg, etwa alle zwei Jahre vergeben. In der Jury, die zu jeder Preisverleihung neu einberufen wird, sind sowohl Wissenschaftler als auch Wissenschaftspublizisten vertreten. Im Jahr 2007 beträgt das **Preisgeld 3000 Euro**. Die Arbeit des (der) Preisträger(in) wird den Lesern von »Sterne und Weltraum« und »Astronomie heute« in angemessener Form vorgestellt werden.

Es sind sowohl Eigenbewerbungen als auch Vorschläge von Dritten möglich. Bitte senden Sie Ihre Bewerbung beziehungsweise Ihren begründeten Vorschlag an:
Dr. Jakob Staude, Max-Planck-Institut für Astronomie, Königstuhl 17, 69 117 Heidelberg

Einsendeschluss: 15. April 2007

PHYSIK

Superman springt zu kurz

Man würde ja schon gerne erklärt bekommen, woher der Held von Crypton seine übermenschlichen Kräfte bezieht – aber nicht so langatmig.

Comicfiguren können fliegen und über Wasser gehen; sie überstehen heil die übelsten Kollisionen, und wie Bugs Bunny stürzen sie erst dann in die Tiefe, wenn sie bemerken, dass sie über einem Abgrund spazieren. Wenn im bunten Comicalltag die Gesetze der Physik nicht verletzt werden, ist das anscheinend purer Zufall. Trotzdem eignen sich Superman und andere bekannte Helden, Physikmuffeln an Universitäten und Schulen den trockenen Lernstoff ein wenig schmackhaft zu machen, so James Kakalios, Professor an der Universität von Minnesota. Denn mit den Superhelden kennen sie sich aus, während sie mit schiefen Ebenen und Pendeln nicht viel anzufangen wissen. Deswegen vermittle sein Buch die so unbeliebte Physik nur ganz nebenbei und beinahe schon unbemerkt, schreibt Kakalios mit großer Eindringlichkeit in seiner Einleitung.

Doch zunächst nimmt er uns auf einen ausgedehnten geisteswissenschaftlichen Ausflug in die Entwicklungsgeschichte des Comics mit und plaudert nebenher aus dem Nähkästchen. Wir erfahren auch einiges über die Konzeption und Entwicklung Supermans, dessen Fähigkeiten im Lauf seiner Comicexistenz immer zahlreicher und auch immer unglaublicher wurden.

Sind dann die ersten 40 Seiten Text überstanden, findet sich endlich doch ein wenig Physik: Supermans Sprungkraft beispielsweise soll helfen, die Gesetze der Mechanik zu verstehen. Was können wir über seinen Heimatplaneten Crypton in Erfahrung bringen, wenn wir seine physische Konstitution betrachten? Wenn wir von der Annahme ausgehen, dass Superman in seiner natürlichen Umwelt keine überdurchschnittlichen Fähigkeiten hatte, so erklärt sich seine unglaubliche Kraft nur dadurch, dass dort die Gravitationskraft um ein Vielfaches größer sein muss als auf der Erde. Da die Muskulatur unseres Helden diesen Bedingungen genetisch angepasst ist, kann er auf der Erde seine außergewöhnlich hohen Luftsprünge vollführen.

Nach ausführlichen Überlegungen und dem Gebrauch einiger weniger Formeln wird klar: Da Superman über ein 200 Meter hohes Gebäude hinwegspringen kann, muss Crypton die Dichte eines Neutronensterns haben. Ein Teelöffel dieses Materials würde auf der Erde mehr als hundert Millionen Tonnen wiegen. Denken wir lieber nicht genauer darüber nach, wie auf solch einem Himmelsobjekt überhaupt eine Zivilisation entstehen konnte und warum den armen Superman während seines Aufenthalts auf der Erde nicht das Schicksal irdischer Raumfahrer ereilte, mangels körperlicher Belastung vom Muskelschwund ausgezehrt zu werden.

Ein weiterer physikalisch ergiebiger Superheld ist »The Flash«, der seit 1940 in verschiedenen Inkarnationen die Comicwelt bevölkert. Seine wahnwitzige Schnelligkeit gibt Kakalios Gelegenheit zur Erklärung des Dopplereffekts, des Überschallknalls und der relativistischen Zeitdilatation: Wenn Flash mit nahezu Lichtgeschwindigkeit durch die Welt saust, vergeht für ihn die Zeit langsamer als für seine trägen Zeitgenossen.

In einem Flash-Comic aus den 1960er Jahren existieren verschiedene Welten am gleichen Ort zur gleichen Zeit, nur indem sie »mit unterschiedlichen Frequenzen schwingen«. Kakalios erörtert auch diese Idee, nicht ohne ihr eine Entwicklungsgeschichte der Quantenphysik voranzustellen. Da Louis-Victor de Broglies Materiewellen aber vom Impuls eines Objekts und nicht von einer mysteriösen »Erdzugehörigkeit« abhängig sind, ist ein solches Szenario der Welt der Comics vorbehalten.

Das Titelbild von »The Flash«, Heft 123, lässt die Leser erstmals ahnen, dass es neben ihrer eigenen Welt noch mindestens zwei Parallelwelten gibt.

Parallelwelten im Comic

Auch dass die verschiedenen Helden einander in ihren jeweiligen Universen besuchen, indem sie »ihre Schwingungen angleichen«, ist mit Physik nicht zu erklären, noch nicht einmal mit der Vielweltentheorie (Spektrum der Wissenschaft 8/2003, S. 34), die Kakalios zur Rettung heranzieht. Denn selbst in dieser umstrittenen Theorie kann kein physikalisches Objekt von einer Parallelwelt in eine andere wechseln.

Die Idee des Buchs ist aller Ehren wert; aber die Durchführung ist dem Autor nicht so recht gelungen. Nicht nur zu Beginn fragt sich der Leser unweigerlich, wer die Zielgruppe sein soll: Das Niveau, auf dem die Physik erklärt wird, lässt auf Zwölfjährige schließen, während die Sprache, der Inhalt der Einführung und die gelegentlichen Scherze eher auf Erwachsene gemünzt sind. James Kakalios mag wohl wissen, was seinen Studenten gefällt; ob seine Leser aber denselben Geschmack haben? Immerhin kann man annehmen, dass sie sich für Physik interessieren. Und gerade diese Leute ermüdet der Autor durch extrem langatmige und ausführliche Erläuterungen sowie die ständige Betonung, dass alles völlig verständlich und einfach dargestellt werden soll.

Emanuela Buyer

Die Rezensentin hat Physik studiert und ist freie Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.

James Kakalios
Physik der Superhelden
Aus dem Amerikanischen von Christoph Hahn und Doris Gerstner. Rogner und Bernhard, Berlin 2006. 445 Seiten, € 29,90

MATHEMATIK UND LITERATUR

Der Enzensberger-Stern

Bescheidener Vorschlag zum Verständnis einer algebraischen Fläche, die neuerdings den Namen eines prominenten Schriftstellers trägt

Von Christoph Pöppe

Für den Dichter und Schriftsteller Hans Magnus Enzensberger sind Ehrungen nichts Ungewohntes. Aber die jüngste hat ihn doch überrascht, wie er selbst freimütig eingestand: Die Deutsche Mathematiker-Vereinigung (DMV) benennt einen – recht ansehnlichen – mathematischen Gegenstand nach ihm, um mit dieser Widmung seine Verdienste um das Bild der Mathematik in der Öffentlichkeit zu würdigen. Unter anderem hat Enzensberger ein Kinderbuch geschrieben, in dem »Der Zahlenteufel« dem kleinen Robert die Angst vor den Zahlen nimmt (Spektrum der Wissenschaft 12/1998, S. 128), und in einer viel beachteten Rede (»Zugbrücke außer Betrieb«) auf dem Internationalen Mathematikerkongress in Berlin 1998 zu Überbrückungsarbeiten aufgerufen: Die Vermittlung von Mathematik an das Publikum wäre »ein langwieriges, aber viel versprechendes Projekt, das im zarten Alter zu beginnen hätte und unseren viel zu trägen Gehirnen ein gewisses Fitness-Training und ganz ungewohnte Lustgefühle verschaffen könnte«.

Der Gegenstand, der neuerdings Enzensbergers Namen trägt, hat die Gestalt eines Sterns mit sechs Spitzen, die durch eine elegant gekrümmte Fläche miteinander verbunden sind (Bild oben). Im Folgenden möchte ich Ihnen, verehrte Leserinnen und Leser, den Enzensberger-Stern nahebringen, und zwar in einer Weise, die dem Geehrten gerecht wird. Das ist nicht ganz einfach, denn dieses mathematische Objekt ist – unter anderem auch – ein Kunstwerk. Gegen die Interpretation eines Kunstwerks hat Enzensberger im Prinzip nichts einzuwenden, wohl aber gegen den Anspruch, es gebe eine einzige »richtige Interpretation«.

Wider den Unfug der richtigen Interpretation

Dagegen hat er in seinem »Bescheidenen Vorschlag zum Schutze der Jugend vor den Erzeugnissen der Poesie« die stärksten Worte gefunden – als indirekt Betroffener, denn auch seine Gedichte zählen zu denjenigen, die trotz ihrer an und für sich harmlosen Natur in »gemeingefährliche Angriffswerkzeuge« verwandelt werden. Der Lehrkörper, der solches praktiziere, mache – bei Nuancen im Einzelnen – »im Ganzen den Eindruck einer kriminellen Vereinigung, die sich mit unsittlichen Handlungen an Abhängigen und Minderjährigen vergeht, wobei es gelegentlich … zu Fällen von offensichtlicher Kindesmisshandlung kommen kann«.

Zu allem Überfluss ist der Versuch, den Enzensberger-Stern begreiflich zu machen, einer schulmäßigen Kurvendiskussion zum Verwechseln ähnlich. Es geht um Nullstellen von Funktionen, Lösungen von Gleichungen und algebraische Umformungen, lauter Gegenstände, die in Schülerkreisen kaum mehr Beliebtheit genießen als interpretationspflichtige Gedichte und bei den Betroffenen bis ins hohe Erwachsenenalter einen üblen Nachgeschmack zu hinterlassen pflegen. Obendrein gilt Mathematik als die Wissenschaft, die unbezweifelte Urteile wie »richtig« oder »falsch« über ihre Gegenstände zu fällen in der Lage ist; der Verdacht, es gehe hier um die richtige Interpretation, drängt sich also förmlich auf.

Das sei ferne von mir. Die Literatur, so Enzensberger in der zitierten Schrift, »verdankt ihren Charme nicht zuletzt der Tatsache, dass es jedermann freisteht, sie zu ignorieren – ein Recht, von dem bekanntlich die Mehrheit unserer Mitbürger entschiedenen Gebrauch macht«. Nun ist die Mathematik zweifellos in vielen Anwendungen von Nutzen, was das Ignorieren in den entsprechenden Fällen erschwert. Aber Nützlichkeit ist nicht die hervorstechendste Eigenschaft des Enzensberger-Sterns. Die nun folgenden Betrachtungen sollen Ihnen also weder vorschreiben, was Sie darin zu sehen haben oder was der Künstler – oder die Mathematik? – damit ausdrücken wollte; sie wollen Ihnen nur etwas darüber erzählen, »wie es gemacht ist«. Zuweilen kann ja die Analyse einer Partitur das Hörerlebnis bereichern.

DMV / ULRICH DAHL

Hans Magnus Enzensberger (Mitte) spielt während des Festakts zu seinen Ehren mit der gläsernen Realisierung des nach ihm benannten sternförmigen Körpers. Günter Ziegler (links), der Präsident der DMV, und der Laudator Professor Jochen Brüning von der Humboldt-Universität Berlin schauen interessiert zu. Das linke Bild zeigt die computergrafische Darstellung des Enzensberger-Sterns von Herwig Hauser.

Dem Betrachter präsentiert sich der Enzensberger-Stern in erster Linie in der Gestalt, die Herwig Hauser, Professor für Mathematik an der Universität Innsbruck, ihm mit Hilfe des Computergrafik-Programmpakets POV-Ray gegeben hat (Bild oben, links). Es gibt auch eine angenäherte Realisierung zum Anfassen in Form eines gläsernen Hohlkörpers, in dem elektrisch angeregte Gasentladungen dekorativ zucken und den Händen des Betrachters folgen (Bild oben, rechts). »Eigentlich« ist er jedoch eine unendlich dünne, gekrümmte Fläche im Raum, und seine »Partitur« ist extrem kurz: Sie besteht nur aus der Formel $400(x^2y^2+y^2z^2+x^2z^2)-(1-x^2-y^2-z^2)^3=0$.

Polynome in drei Variablen

Gemeint ist die Menge aller Punkte (x, y, z) im dreidimensionalen Raum, für die diese Gleichung erfüllt ist; das setzen Mathematiker stillschweigend voraus, wenn sie über derlei Flächen reden, und identifizieren gedanklich die Formel mit der Fläche. Es ist üblich, die Gleichung so zu formulieren, dass auf der linken Seite des Gleichheitszeichens alles Wesentliche steht und auf der rechten nur noch die Null, die man dann auch noch weglassen kann. Man untersucht also die Menge aller Lösungen einer gewissen Gleichung mit drei Unbekannten oder, was dasselbe ist, die Menge der Nullstellen einer Funktion in den drei Variablen x, y und z. »Die Fläche $x^2+y^2+z^2-1$« ist die kurz gefasste Ausdrucksweise für die Menge aller Punkte mit den Koordinaten x, y und z, deren Quadratsumme gleich 1 ist; das ist die Oberfläche einer Kugel.

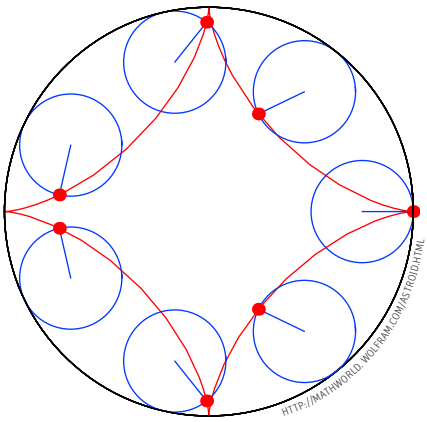
Die Funktionen, um die es hier geht, gehören zum Elementarsten, was der mathematische Werkzeugkasten zu bieten hat: Es sind Polynome. Man multipliziert die Variablen x, y und z ein paarmal mit sich selbst, miteinander und mit irgendwelchen Konstanten; von den so entstandenen Termen addiert man einige zusammen, und fertig ist das Polynom. Dass im Enzensberger-Polynom vier derartige Terme eingeklammert und zur dritten Potenz erhoben sind, tut der Sache keinen Abbruch. Man könnte die Klammern ja ausmultiplizieren und damit die geforderte Form herstellen. Nur wäre der so erzeugte Formelsalat dem Verständnis nicht unbedingt förderlich.

Allgemein kann man Polynome addieren oder miteinander multiplizieren und erhält wieder ein Polynom. Diese und andere Eigenschaften machen sie zum beliebten Forschungsobjekt. In der Natur kommen sie dagegen selten vor.

Wie man eine Fläche auch dreht und wendet, ob man sie von nah oder fern betrachtet, sie bleibt eigentlich immer dieselbe. Die zu Grunde liegende Formel dagegen ändert ihre Gestalt, wenn man die Fläche rotiert, verkleinert und vergrößert. Daher setzen die Mathematiker ihren Ehrgeiz darein, unter den vielen denkbaren Formeln für ein und dieselbe Fläche die einfachste und schönste überhaupt mögliche zu finden. Die Formel für den Enzensberger-Stern zum Beispiel ist so gebaut, dass sein Mittelpunkt im Nullpunkt liegt und seine sechs Spitzen auf den drei Koordinatenachsen – jeweils eine auf der positiven wie auf der negativen Seite. Den Maßstab wählt man in der Regel so, dass irgendwelche konstanten Faktoren möglichst gleich eins werden. Daher erregt der merkwürdige Faktor 400 vor der ersten Klammer zunächst hochgezogene Augenbrauen – »muss das sein?« –; aber davon später mehr.

Bei diesem Rotieren und Maßstabverändern bleibt im Allgemeinen kein einziger Term des Polynoms unverändert, wohl aber eine Größe: der Grad des Polynoms. Man summiere in jedem Einzelterm die Exponenten und nehme den größten. Das Enzensberger-Polynom hat den Grad 6.

Je höher der Grad, desto komplizierter und vielgestaltiger werden die zugehörigen Flächen. Polynome vom Grad 1 können nur Ebenen erzeugen. Aus Polynomen vom Grad 2 werden unter anderem die Verallgemeinerungen dessen, was man in zwei Dimensionen als Kegelschnitte kennt: Kugeln, Ellipsoide, unendlich ausgedehnte Eierbecher (Paraboloide) und so weiter. Erst ab dem Grad 3 gibt es so merkwürdige Dinge wie Selbst- ▷

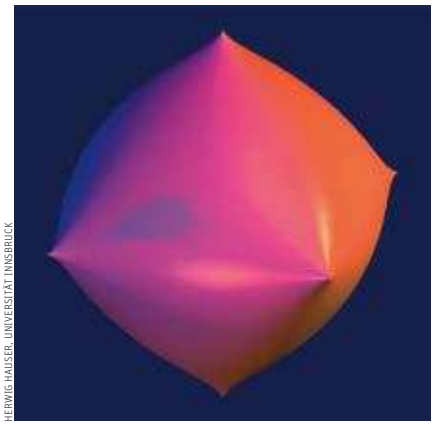


Die Astroide ist die spezielle Hypozykloide, die ein Punkt auf dem Umfang eines Kreises erzeugt, der seinerseits innen an einem Kreis vom vierfachen Radius abrollt.

▷ durchdringungen und Flächen, die aus mehreren getrennten Teilen bestehen.

Herwig Hauser, der eine große Anzahl algebraischer (durch Polynome definierter) Flächen visualisiert hat, beschreibt eine wesentliche Eigenschaften dieser Flächen mit den treffenden Worten »glatt wie ein Babypopo«. Im Allgemeinen gibt es in einem Punkt einer algebraischen Fläche eine Tangentialebene. Allerdings schmiegt die sich nicht, wie beim Babypopo, schön von einer Seite an die Fläche an, sondern durchdringt sie, sodass in einer Umgebung des Berührpunkts die Fläche Anteile zu beiden Seiten der Tangentialebene hat. Und außerdem gibt es, wie beim Babypopo, nicht in jedem Punkt eine Tangentialebene.

Der »verfettete« Enzensberger-Stern mit dem Faktor 1 statt 400 vor dem ersten Term der Gleichung



So sind die Spitzen des Enzensberger-Sterns »Singularitäten«. In ihrer unmittelbaren Nähe ist der Stern von annähernd kreisförmigem Querschnitt, und in jedem Punkt in der Nähe einer Spitze gibt es eine Tangentialebene, die insbesondere an den angenäherten Querschnittskreis tangential ist. Wo aber dieser Kreis auf einen Punkt zusammenschrumpft: In welcher Richtung sollte die arme Tangentialebene in diesem Punkt liegen, wenn es sie gäbe?

Während die Polynome an Einfachheit kaum zu übertreffen sind, macht die Forderung, man möge sich um deren Nullstellen kümmern, die Sache überraschend kompliziert. Es gibt ja auch die parametrisierte Darstellung für eine Fläche im Raum; so beschreibt man die Erdoberfläche bequem durch eine Funktion, die zu jeder Kombination aus Längen- und Breitengrad die Höhe über dem Meeresspiegel angibt. Ein Berg wird neu entdeckt? Kein Problem – man ändert die Funktion an dieser Stelle geeignet ab.

Flächen zurechtbiegen

Was jedoch mit den Nullstellen geschieht, wenn man die Funktion abändert, ist nicht von vornherein klar. Es gibt die merkwürdigsten Überraschungen. Auch für die Aufgabe, eine Fläche mit vorgegebenen Eigenschaften zurechtzubasteln, gibt es kein Standardverfahren; aber ein Flächenkünstler wie Herwig Hauser verfügt über einige Quellen der Inspiration und nützliche Techniken.

Er löst zunächst ein einfacheres zweidimensionales Problem: Welches Polynom in zwei Variablen x und y erzeugt ein Viereck mit krummen, nach innen gebogenen Seiten? Das ist das, was der Enzensberger-Stern zeigt, wenn man $z=0$ setzt oder, was dasselbe ist, den Stern entlang einer Ebene, die durch vier seiner sechs Spitzen geht, entzweischneidet.

Man sucht und wird fündig bei einer Kurve, die ein Kreis erzeugt, der an einem anderen Kreis abrollt. Nach einigem Umrechnen mit Formeln für den Sinus des dreifachen Winkels stellt sich heraus, dass die so genannte Astroide (Bild links oben) der Gleichung $x^{2/3}+y^{2/3}=1$ genügt, was zur dritten Potenz genommen und etwas umgeformt die Polynomgleichung sechsten Grades $27\,x^2y^2 = (1-x^2-y^2)^3$ ergibt.

Das sieht dem vollständigen Enzensberger-Polynom zwar schon sehr ähnlich; aber so einfach ist der Übergang von zwei auf drei Dimensionen dann doch nicht. Man muss noch einbringen, dass das Endprodukt die Symmetrie des Oktaeders haben soll. Das ist der platonische Körper aus acht gleichseitigen Dreiecken, wobei jeder der sechs Ecken vier der Dreiecke anliegen. Am besten legt man die Ecken des Oktaeders wie die Spitzen des Sterns auf die Koordinatenachsen. Dann lässt sich nämlich die Symmetrieforderung auf folgende Weise ausdrücken:

Erstens soll das Polynom unverändert bleiben, wenn man x durch $-x$ ersetzt, ebenso für y und z; das entspricht einer Spiegelung des Oktaeders an einer Ebene, die durch vier Ecken geht. Diese Forderung kann das Polynom dadurch erfüllen, dass es nur gerade Potenzen von x, y und z enthält; Faktoren wie x allein oder y^3 dürfen nicht vorkommen.

Zweitens soll das Polynom auch unter Vertauschung von zwei seiner Variablen – zum Beispiel x gegen y – unverändert bleiben. Beides zusammen ist nur dadurch erreichbar, dass das Polynom aus den »elementaren symmetrischen Polynomen« $x^2+y^2+z^2$, $x^2y^2+y^2z^2+z^2x^2$ und $x^2y^2z^2$ zusammengesetzt ist. Es stellt sich heraus, dass von diesen drei Polynomen nur die ersten beiden Verwendung finden, und zwar in einer Weise, die das zweidimensionale Beispiel nahe legt.

Und der Faktor 400? Der hat rein ästhetische Gründe. Mit dem von der Astroide übernommenen Faktor 27 sieht die Fläche einfach ziemlich mollig aus und mit dem Faktor 1, den ein Formelästhet bevorzugen würde, sogar krankhaft übergewichtig (Bild links). Erst der ziemlich hohe Faktor lässt die Flanken im richtigen Ausmaß abmagern und verleiht dem Stern seine ansprechende Eleganz. ◁

Christoph Pöppe ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Zugbrücke außer Betrieb/Drawbridge Up (deutsch/englisch). Von Hans Magnus Enzensberger. A K Peters, Wellesley (Massachusetts) 2001

Der Zahlenteufel. Ein Kopfkissenbuch für alle, die Angst vor der Mathematik haben. Von Hans Magnus Enzensberger. Hanser, München 1997

Bescheidener Vorschlag zum Schutze der Jugend vor den Erzeugnissen der Poesie. Von Hans Magnus Enzensberger in: Mittelmaß und Wahn. Gesammelte Zerstreuungen. Suhrkamp 1991, S. 23

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/859309.

Diesen Artikel können sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Vom Glauben zum Wissen und zurück

Dem Papst zufolge kann Wissenschaft ohne Religion nicht zur Wahrheit gelangen. Ist das zu glauben?

»Den Himmel überlassen wir den Engeln und den Spatzen« Heinrich Heine, Ein Wintermärchen

Von Michael Springer

Am 12. September 2006 hielt Papst Benedikt XVI. an der Universität Regensburg einen Vortrag über das Verhältnis von Glaube und Vernunft, der zunächst wegen einer Passage über den Islam Aufsehen erregte: Anhand eines historischen Zitats wollte das Oberhaupt der katholischen Kirche belegen, dass ein Glaube ohne Vernunft – wofür der Islam herhalten sollte – in die Irre gehen müsse. Als positives Gegenbeispiel hob Benedikt die Synthese von altgriechischer Philosophie und Christentum hervor, die er zum Paradigma einer gelungenen Vereinigung von Vernunft und Glaube erklärte.

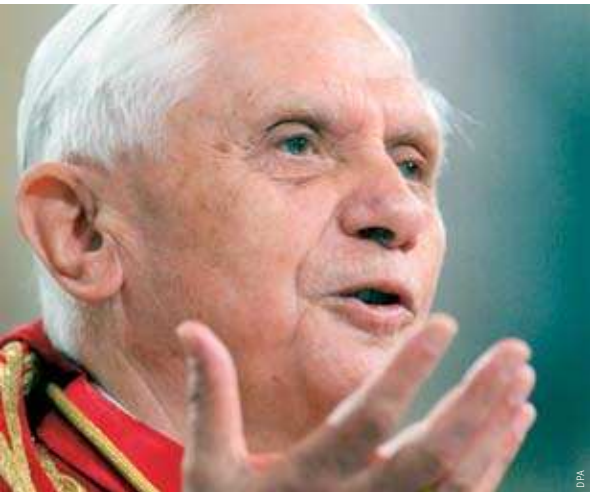
In der aufgeregten Debatte über Benedikts Behauptung, das christliche Abendland sei dem islamischen Morgenland hinsichtlich Vernünftigkeit und Toleranz wesentlich überlegen, blieb die eigentliche Stoßrichtung seines Vortrags fast unbemerkt. Denn dass Glaube ohne Vernunft nichts tauge, bildete in der Regensburger Rede nur das ergänzende Gegenstück zu der eigentlich viel provokanteren Umkehrthese, Vernunft ohne Glaube sei erst recht nichts wert: Bloße Vernunft sei beschränkt und geradezu schädlich, da sie den Menschen in seiner Ganzheit verfehle.

Diese Botschaft verkündete Benedikt schon, als er noch Kardinal Joseph Ratzinger war und als Präfekt der römischen Glaubenskongregation – Nachfolgerin der heiligen Inquisition – im September 1998 die Enzyklika »Fides et Ratio« des damaligen Papstes Johannes Paul II. vorstellte. Diese Enzyklika trägt offenkundig Ratzingers Handschrift, und der Regensburger Vortrag des späteren Papstes mutet an wie eine persönlicher gehaltene Zusammenfassung der damaligen Thesen.

»Glaube und Vernunft sind wie die beiden Flügel, mit denen sich der menschliche Geist zur Betrachtung der Wahrheit erhebt«
Enzyklika »Fides et Ratio«

»Glaube und Vernunft (Fides et Ratio) sind wie die beiden Flügel, mit denen sich der menschliche Geist zur Betrachtung der Wahrheit erhebt«, lautet der erste Satz der Enzyklika. Das besagt, dass der Mensch ohne Glauben so wenig zur Wahrheit gelangen kann, wie ein Vogel mit amputiertem Flügel zu fliegen vermag. Diese Zweischwingenthese steht in so argem Widerspruch zu jeder halbwegs gängigen Bedeutung, die man heutzutage mit den Begriffen Glaube, Vernunft und Wahrheit verbindet, dass der Papst statt eines Höhenflugs des menschlichen Geistes dessen steten Niedergang konstatieren muss. »In der westlichen Welt herrscht weithin die Meinung, allein die positivistische Vernunft und die ihr zugehörigen Formen der Philosophie seien universal«, tadelt Benedikt in der Regensburger Rede, und als Kardinal Ratzinger fasste er acht Jahre früher den Kern der Enzyklika »Fides et Ratio« so zusammen:

»Der christliche Glaube ist einerseits dazu verpflichtet, sich solchen Philosophien oder Theorien entgegenzustellen, welche die Neigung des Menschen, die metaphysische Wahrheit der Dinge erkennen zu wollen, ausschließen (Positivismus, Materialismus, Szientismus, Historismus, Problematizismus, Relativismus, Nihilismus). Andererseits verteidigt der Glaube, indem er die Möglichkeit einer metaphysischen und rationalen Reflexion ver-



»In der westlichen Welt herrscht weithin die Meinung, allein die positivistische Vernunft sei universal« Papst Benedikt XVI. in seiner Regensburger Rede

teidigt, welche in der Forschungsmethode autonom bleibt und ihre eigene Natur behält, die Würde des Menschen und fördert so die Philosophie, indem er sie dazu auffordert, sich mit dem tiefen und letzten Sinn des Seins, des Menschen und der Welt zu befassen.«

Daraus geht hervor: Unter »Glaube« ist christliches – eigentlich katholisches – Dogma zu verstehen, mit »Vernunft« ist Metaphysik gemeint, und »Wahrheit« soll etwas Hohes oder Tiefes, jedenfalls Letztes bedeuten, zu dem sich Dogma und Metaphysik zu erheben suchen. Dabei lassen »Glaube und Vernunft« mit vereintem Flügelschlag die sieben zitierten Ismen möglichst weit unter sich, als wären dies ebenso viele Todsünden.

Taumeln zwischen Versuch und Irrtum

Doch unter dem, was sich dort unten tummelt, überschüttet mit an Zischlauten reichen Verdammungsworten von Positivismus bis Nihilismus, in fahles Licht getaucht wie die Ausgeburten eines Höllen-Brueghel, lugt genauer besehen nichts anderes hervor als die neuzeitliche Naturwissenschaft. Das schlechte Licht, das auf sie von oben fällt, ist die Strafe dafür, dass Naturforschung sich von Anfang an durch ihre nichtreligiöse, nichtmetaphysische Methode auszeichnete. Was für ein befreiender Anfang! Endlich einmal sollten nicht wieder die überkommenen Schriften neu studiert und interpretiert werden, nicht immer nur die reine Lehre gepredigt und Ketzer bestenfalls getadelt werden, schlimmstenfalls verbrannt – sondern die neue, hemdsärmelige Parole hieß: Zu den Sachen selbst! Interessante Fakten wurden neugierig gemessen und gewogen, im Fernrohr betrachtet und unter dem Mikroskop studiert, und, wenn nötig, bei Nacht und Nebel exhumiert und seziert.

Darum lässt sich heute schlecht behaupten, das Streben nach Erkenntnis gleiche einem Steigflug auf den einträchtig tragenden Schwingen von Glaube und Vernunft. Eher ähnelt es dem Taumeln eines Schmetterlings zwischen Versuch und Irrtum. Wissenschaftliche Neugier und ungehemmte Probierlust galten der Kirche von Anfang an als Sakrileg, und nur äußerst widerstrebend bequemte sie sich, den profanen Entdeckungen, als sie nun einmal in der Welt waren, ihren Lauf zu lassen. Die Verurteilung Galileo Galileis (1564–1642), weil er empirische Indizien für die Bewegung der Erde um die Sonne vorbrachte, wurde erst 1992 von Papst Benedikts Vorgänger offiziell bedauert. Umgekehrt ist der heuristische Wert der Religion für die Naturforschung praktisch gleich null. Kaum eine Ausnahme bestätigt die Regel: Der belgische Jesuitenpater Georges Lemaître (1894–1966) erdachte eine Form der Urknalltheorie vermutlich deshalb als Erster, weil sie seinen religiösen Bedürfnissen entgegenkam; andererseits erschwerte gerade dieser Umstand zunächst die Akzeptanz des Urknallmodells unter den Physikern.

Wer aus dem Schoß der Kirche heraus versuchte, die Ergebnisse der Naturforschung mit christlichem Gedankengut zu versöhnen, hatte einen schweren Stand – und setzte sich damit oft zwischen alle Stühle. Der französische Jesuit und Paläontologe Pierre Teilhard de Chardin (1881–1955) wollte in seinem Hauptwerk »Le phénomène humain« (deutsch »Der Mensch im Kosmos«) eine Synthese zwischen Evolutionstheorie und christlichem Schöpfungsglauben zu Wege bringen. Der Vatikan brandmarkte die Schrift als Irrlehre und verbot ihren Druck, der Jesuitenorden verbannte den Ketzer aus Frankreich; er starb vereinsamt in den USA.

Auch unter Evolutionsforschern stieß Teilhards Versuch, als er postum veröffentlicht wurde, auf wenig Zustimmung. Besonders scharf urteilte Peter B. Medawar (1915–1987, ▷

▽ Zwei religiöse Naturforscher: Georges Lemaître (oben) postulierte die Explosion eines »Uratoms« als Ursprung des expandierenden Universums, Pierre Teilhard de Chardin (unten) stellte seine paläontologischen Forschungen in den Rahmen der biblischen Erlösungsgeschichte.

UNTEN: BRIDGEMAN GIRAUDON; OBEN: AKG BERLIN

Nobelpreis für Medizin 1960): Das Buch »kommt antiwissenschaftlichen Neigungen entgegen« und »ist in einem nahezu total unverständlichen Stil geschrieben«, meinte Medawar 1961 in der Zeitschrift »Mind«. Er bemängelte vor allem, Teilhard deute die Evolution als einen Prozess fortschreitender Vergeistigung, als eine Art Sog zu Höherem, der am Ende der Welt, beim Jüngsten Gericht, in einem spirituellen »Punkt Omega« kulminieren solle. Teilhard hätte sich besser für die damals noch unentschiedene Frage interessiert, fand Medawar, an welchem Erbmolekül die Mutation angreife, die treibende Kraft der Evolution.

Wissenslücken und große Worte

Alle derartigen Versöhnungsversuche zwischen (wissenschaftlicher) Vernunft und (christlichem) Glauben kranken an dem gleichen Defekt, der sie sowohl für Theologen wie für Naturforscher letztlich ungenießbar machen muss. Das im Lauf des Forschungsprozesses gesammelte und immer wieder neu geordnete Wissen weist zu jedem Zeitpunkt gewaltige Lücken auf. Da Ort, Form und Größe der Wissenslücken sich fortwährend wandeln, ist es jederzeit verfrüht, diese klaffenden Öffnungen mit spekulativen Ideen zu verstopfen. Indem die Idee die Öffnung schließt, erklärt sie das Problem für gelöst. So postulierte der französische Philosoph Henri Bergson (1848–1941) zu Beginn des 20. Jahrhunderts den »Élan vital«, eine Lebensenergie, die das seinerzeit noch rätselhafte Problem erklären sollte, durch welche Einflüsse im Lauf der biologischen Phylo- und Ontogenese komplexe Organismen geformt werden. Auch manche Biologen glaubten damals an eine spezielle Lebenskraft *(vis vitalis)*, die den befruchteten Zellhaufen veranlasse, sich zu einem Embryo auszudifferenzieren. Hätten es alle Naturforscher bei diesen scheinbaren Erklärungen belassen, das heißt bei leeren Worten, so wären die biochemischen Mechanismen der Vererbung und der Ontogenese nie gesucht und daher auch nie gefunden worden.

In gleicher Weise spielt in den christlichen Deutungsversuchen des jeweils aktuellen Forschungsstands Gott die unrühmliche Rolle des Lückenbüßers. Dort, wo man noch nichts Bestimmtes weiß, ist Raum für große Worte, und flugs diffundiert Gott in die Poren des Wissens, als wäre er tatsächlich nur das »gasförmige Wirbeltier«, als das der Zoologe Ernst Haeckel (1834–1919) die gängige Gottesvorstellung einst verspottete.

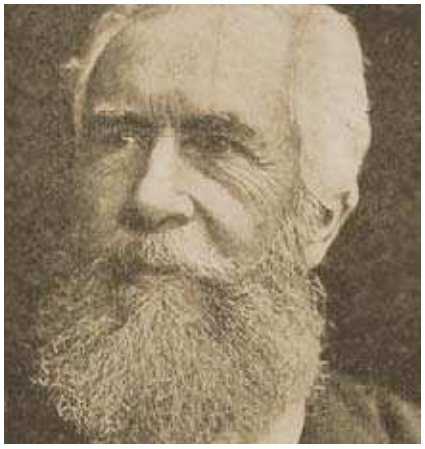
Heute klaffen die größten Wissenslücken »ganz unten« und »ganz oben«: einerseits bei den fundmentalen Rätseln der Teilchenphysik und Kosmologie, andererseits in der Hirnforschung. Folglich bleibt tief unten und hoch oben noch viel Platz für Gottesglauben.

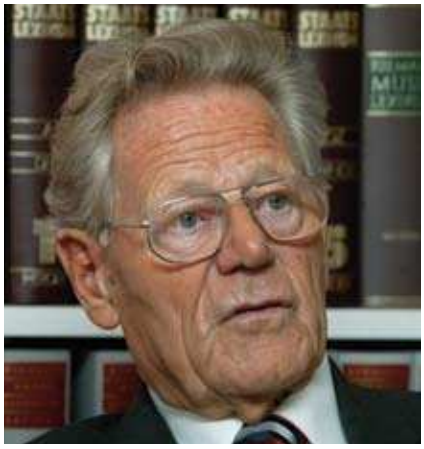
Zu den fundamentalen Rätseln der Kosmologie gehört, weshalb wichtige Naturkonstanten gerade so beschaffen sind und nicht anders. Warum ist der Raum so flach? Warum ist die kosmologische Konstante so klein? Warum haben die Elementarteilchen so unterschiedliche Massen und warum sind die Naturkräfte so verschieden stark? Fest steht nur, dass schon geringfügig andere Werte kein Universum ergeben könnten, in dem Sterne, Planeten oder gar Lebewesen möglich wären – und schon gar kein vernunftbegabtes Wesen, das sich Gedanken über Glaube, Vernunft und kosmologische Konstanten macht. Solche Probleme kommen schon sehr nahe an die letzten Fragen heran, die als Schöpfungsmythen traditionell der Religion vorbehalten waren. Man kann darin einen Beweis für das ungeheuer gewachsene Wissen sehen, mit dem eben auch die Größe der offenen Fragen zugenommen hat. Ein religiöser Mensch wie der katholische Theologe Hans Küng findet hier genug Raum für seinen Gottesglauben (siehe Spektrum der Wissenschaft 4/2006, S. 100). Von vornherein ist nicht auszuschließen, dass die Wissenschaft gerade jetzt an eine prinzipielle kosmologische Grenze stößt und Gott aus diesem Reservat niemals durch neue Erkenntnisse vertreiben wird. Wir wissen nur, dass so etwas – absoluter Stillstand des Wissens – bisher noch nie der Fall gewesen ist.

Die zweite Lücke ist so unermesslich groß, dass man besser von einer nach oben offenen Unendlichkeit sprechen sollte. Über unseren physikalischen, chemischen und biologischen Wissenssystemen ragt die Domäne des »Geistigen« empor: die Welt der Gedanken und Emotionen, des subjektiven Erlebens, der moralischen Werte – und nicht zuletzt das Reich des Glaubens und der Religion. Was hat die Naturwissenschaft da oben verloren?

Gar nichts, meint der Papst. »Nur die im Zusammenspiel von Mathematik und Empirie sich ergebende Form von Gewissheit gestattet es, von Wissenschaftlichkeit zu sprechen. Was Wissenschaft sein will, muss sich diesem Maßstab stellen«, konstatierte er in Regensburg und fuhr fort:

»So versuchen dann auch die auf die menschlichen Dinge bezogenen Wissenschaften wie Geschichte, Psychologie, Soziologie, Philosophie sich diesem Kanon von Wissenschaftlichkeit anzunähern. Wichtig für unsere Überlegungen ist aber noch, dass die Methode als solche die Gottesfrage ausschließt und sie als unwissenschaftliche oder vorwissenschaftliche Frage erscheinen lässt. Damit





LINKS: DPA; MITTE: PUBLIC DOMAIN; RECHTS: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, M. GROHE

Der Biologe Peter B. Medawar (links) kritisierte Versuche, die Evolution zu »vergeistigen«. Der Zoologe Ernst Haeckel (Mitte) spottete, man denke sich Gott als »gasförmiges Wirbeltier«. Hingegen sieht der Theologe Hans Küng (rechts) in den offenen Fragen der modernen Naturwissenschaft Raum für religiöses Gedankengut.

aber stehen wir vor einer Verkürzung des Radius von Wissenschaft und Vernunft, die in Frage gestellt werden muss.«

In der Tat versucht die Wissenschaft immer, den Radius ihrer Erklärungsmittel so kurz wie möglich zu halten. Ihre Methode ist nun einmal reduktionistisch. Als erklärt gilt ein komplexes Phänomen dann, wenn es sich auf etwas Einfacheres zurückführen lässt: die Bahnen der Planeten auf das Fallgesetz, das Periodensystem der chemischen Elemente auf die Quantenstatistik der Elektronen, die biologische Vererbung auf die DNA-Struktur, die Vielfalt der Lebensformen auf das Zusammenspiel von Mutation und Selektion über geologische Zeitspannen hinweg. Gegenwärtig beginnt die Wissenschaft, diese Methode auf geistige Phänomene anzuwenden, indem sie das menschliche Gehirn erforscht.

Ist Hirnforschung geistfeindlich?

Die methodische Reduktion geistiger Phänomene auf Hirnvorgänge stößt auf besonderen Widerstand, weil uns dieses Unternehmen in nie gekannter Weise auf den Leib rückt. Manche bestreiten von vornherein, dass unser Gehirn überhaupt fähig sein kann, sich selbst zu erforschen. Darauf lässt sich trocken erwidern: Es kommt auf den Versuch an. – Aber was bleibt von unserem freien Willen, vom subjektiven Erleben, wenn es auf neuronale Prozesse reduziert wird? Heute werden sogar moralische Phänomene wie das Gerechtigkeitsempfinden in Fairness-Experimenten erforscht, und dabei wird nach spezifischen Hirnarealen gesucht, die bei solchen Aufgaben besonders aktiv sind.

Noch ist gar nicht absehbar, wie weit diese Forschungen tragen. Vielleicht erweist sich das Gehirn als ein so dicht vernetztes, ganzheitliches Objekt, dass uns die Hirnforschung dem Verständnis geistiger Prozesse kaum näherbringen wird. Vermutlich ist das einzelne Gehirn sogar ein allzu beschränktes Forschungsobjekt, da sich der individuelle Geist doch von Anfang an in Wechselwirkung mit seinesgleichen entwickelt. Das wird sich zeigen. Der Reduktionismus ist kein Dogma, sondern funktioniert nach der pragmatischen Devise: so reduktionistisch wie möglich, so holistisch wie nötig.

Auch bringt die Forschung, indem sie ein komplexes Phänomen erklärt, dessen Reichtum ja nicht zum Verschwinden. Der Sternenhimmel wird durch die Astronomie nicht fade, der Zoobesuch durch Darwin nicht banal – ganz im Gegenteil. Ebenso verschwindet nichts von meinem psychischen Erleben, wenn ich mehr über die zu Grunde liegenden Hirnvorgänge weiß. Weder verblassen die erlebten Farben noch erlahmt mein Wille, und Moralentscheidungen werden nicht beliebig, wenn wir ihnen auf den Grund gehen.

Wie im Fall der Kosmologie gibt es aber auch für die Neurowissenschaft keine Erfolgsgarantie. Möglicherweise stößt die Erforschung des Gehirns tatsächlich an eine unübersteigbare Selbsterkenntnisschranke. Dann erginge es der Hirnforschung wie der fiktiven Solaristik in Stanislaw Lems Roman »Solaris«. Dort scheitert der menschliche Verstand an der Erforschung eines fernen Planeten, der von einer fremdartigen, hirnähnlichen Substanz überzogen ist. Lem verwendet viel Einfallsreichtum auf die unterschiedlichen Ansätze, Teilerfolge und Sackgassen der Solaristik, die zwischen Reduktionismus und Holismus erfolglos hin- und herpendelt.

Dass es mit der Hirnforschung so enden wird, glaube ich nicht. Das ist freilich auch ein »Glaube«, aber kein religiöser; er verlässt sich auf die bisherigen Erfolge der naturwissenschaftlichen »Vernunft«. Mit deren Erfolgsgeschichte ist künftiger Erkenntnisgewinn zwar keineswegs garantiert, doch bleibt der beherrschende Platz, den Benedikt für den Gottesglauben beansprucht, ein prekärer Aufenthaltsort. Jeder Glaube ist ein Wagnis. ◁

Michael Springer ist freier Mitarbeiter bei Spektrum der Wissenschaft.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Schöpfung ohne Schöpfer? Das Wunder des Universums. Von Gerhard Börner. DVA, München 2006

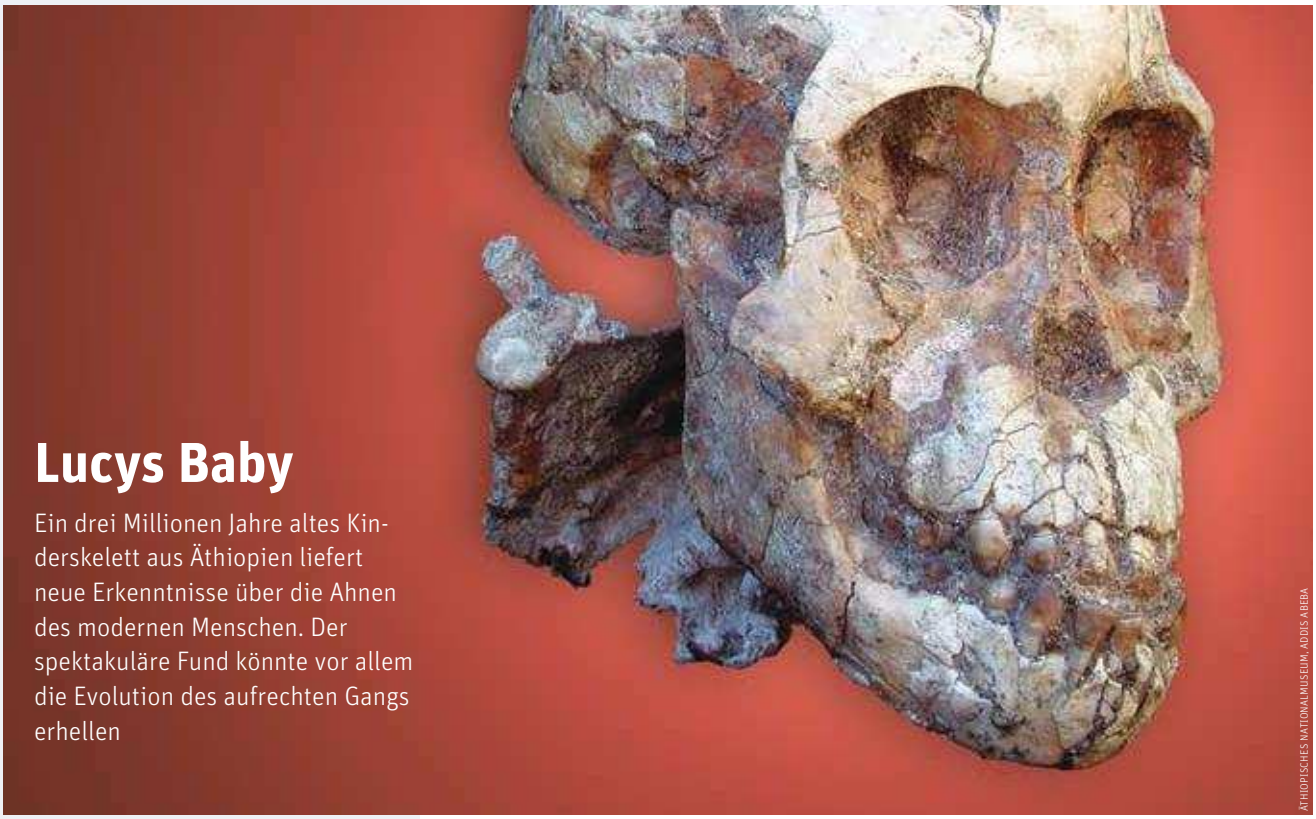
Der Anfang aller Dinge. Naturwissenschaft und Religion. Von Hans Küng. Piper, München 2005

Vernunft und Glaube. Von Franz von Kutschera. De Gruyter, Berlin 1991

Die Kunst des Lösbaren. Reflexionen eines Biologen. Von Peter B. Medawar. Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen 1972

Der Mensch im Kosmos. Von Pierre Teilhard de Chardin. Beck, München 1959

Weblinks finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/858954.



ÄTHIOPISCHES NATIONALMUSEUM, ADDIS ABEBA

Lucys Baby

Ein drei Millionen Jahre altes Kinderskelett aus Äthiopien liefert neue Erkenntnisse über die Ahnen des modernen Menschen. Der spektakuläre Fund könnte vor allem die Evolution des aufrechten Gangs erhellen

WEITERE THEMEN IM FEBRUAR

Synthetische Biologie

Methoden der Ingenieurwissenschaften könnten der Biotechnik einen ähnlichen Schub geben wie einst der Halbleitertechnik

Klima versetzt Berge

Nach neuesten Erkenntnissen besteht ein Wechselspiel zwischen geologischen Prozessen, die Gebirge auffalten, und Erosionsvorgängen, die sie wieder abtragen

Simulationstraining für Chirurgen

Geschickt programmierte Hard- und Software lässt Operateure am täuschend echten Modell ihr Handwerk üben – ohne jedes Blutvergießen

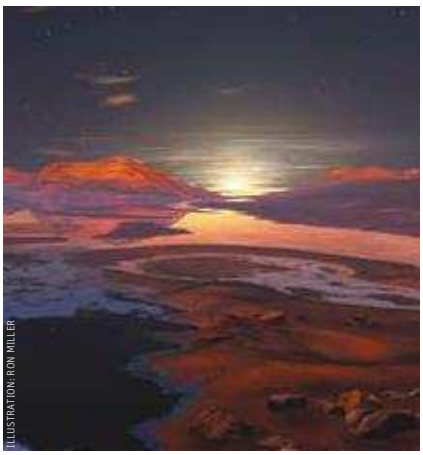


ILLUSTRATION: RON MILLER

Wasserplanet Mars

Dass es auf dem roten Nachbarplaneten einst Wasser gab, gilt als gesichert. Doch wie neue Beobachtungen zeigen, bedeckten die Fluten sogar große Teile der Marsoberfläche – vielleicht eine Milliarde Jahre lang

Ersatz für Tierversuche

Neue Sicherheitstests für Arzneien und Chemikalien ersparen Millionen Versuchstieren das Leiden. Die Alternativen sind nicht nur billiger, sondern auch zuverlässiger

CARY WOLINSKY